



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

OSVĚTLOVACÍ SYSTÉMY ZAMĚŘENÉ NA ZLEPŠENÍ KOGNITIVNÍCH FUNKCÍ

LIGHTING SYSTEMS FOCUSED TO IMPROVE COGNITIVE FUNCTIONS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jakub Hurbanič

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Petr Baxant, Ph.D.

BRNO 2020



VYSOKÉ UČENÍ FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
TECHNICKÉ A KOMUNIKAČNÍCH
V BRNĚ TECHNOLOGIÍ

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Elektroenergetika**

Ústav elektroenergetiky

Student: Bc. Jakub Hurbanič **ID:** 183431 **Ročník:** 2 **Akademický rok:** 2019/20

NÁZEV TÉMATU:

Osvětlovací systémy zaměřené na zlepšení kognitivních funkcí

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Vliv světla na člověka
2. Technologie používané v praxi
3. Návrh testování vlivu světla na kognitivní výkon člověka

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 3.2.2020

Termín odevzdání: 1.6.2020

Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Baxant, Ph.D.

doc. Ing. Petr Toman,
Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Vysoké učení technické v Brně / Technická 3058/10 / 616 00 / Brno

Abstrakt

Práca sa zaoberá osvetľovacími systémami zameranými na zlepšenie kognitívnych funkcií. Práca je rozdelená do štyroch častí.

V prvej časti je prebraný vplyv svetla na človeka. Je tu rozobraná problematika spracovania svetelného signálu zrakovým systémom človeka, vrátane vplyvu modrého svetla na organizmus ale aj vplyvu ultrafialového a infračerveného svetla na človeka.

Druhá časť sa venuje cirkadiánnemu rytmu ľudí. Je tu prezentovaný vplyv cirkadiánného rytmu na telesné pochody vrátane vplyvu na kognitívny výkon u ľudí.

Tretia časť prezentuje technológie osvetľovacích sústav pre zvyšovanie kognitívneho výkonu, ktoré sú dostupné na dnešnom trhu.

Posledná časť predstavuje návrh testovania pro-kognitívneho osvetlenia.

Kľúčové slová

cirkadiánnny rytmus, kognitívny výkon, osvetľovacia sústava, modré svetlo, testovanie vplyvu svetla

Abstract

This diploma thesis deals with lighting systems focused to improve cognitive functions. It's divided into four parts.

In first part is discussed effect of light on humans. Issues about processing of light by human visual system are being discussed, including effect of blue light on organism but also effects of ultraviolet and infrared radiation on humans.

Second part is dedicated to human circadian rhythm. Effect of this rhythm on physical processes is being presented, including its influence on human cognitive performance.

Third part presents lighting technologies for improving of cognitive performance, which are available on today's market.

Last part introduce design of testing of pro-cognitive lighting.

Keywords

circadian rhythm, cognitive performance, lighting system, blue light, light testing

Bibliografická citácia

HURBANIČ, Jakub. *Osvetľovacia systémy zamerané na zlepšenie kognitívnych funkcií* [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-05-13]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/127230>. Diplomová práca. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky. Vedúci diplomovej práce Petr Baxant

Prehlásenie

Prehlasujem, že svoju diplomovú prácu na tému Osvetľovacie systémy zamerané na zlepšenie kognitívnych funkcií som vypracoval samostatne pod vedením vedúceho diplomovej práce a s použitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce. Ako autor uvedenej diplomovej práce ďalej prehlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto diplomovej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, menovite som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovení § 11 a nasledujúcich autorského zákona č. 121/2000 Sb., vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovenia časti druhej, hlavy VI. diel 4 Trestného zákonníku č. 40/2009 Sb.

V Lozorne dňa 20.5.2020

.....

podpis autora

Pod'akovanie

Ďakujem vedúcemu diplomovej práce doc. Ing. Petrovi Baxantovi, Ph.D. za účinnú metodickú, pedagogickú a odbornú pomoc a ďalšie cenné rady pri spracovaní mojej diplomovej práce, ale aj za rozšírenie obzorov a iný pohľad nie len na svet techniky. Tak isto by som chcel poďakovať Ing. Jaroslavovi Štěpánkovi a pánovi Hynkovi Medřickému za poskytnutie cenných zdrojov informácií, potrebných pre spracovanie tejto diplomovej práce

V Lozorne dňa 20.5.2020

.....

podpis autora

Obsah

Zoznam symbolov a skratiek	9
Zoznam obrázkov	10
Úvod	12
1. Svetlo a človek.....	13
1.1 História vplyvu svetla na organizmy	13
1.2 Oko ako snímač	15
1.3 Svetlo ako zdroj informácie.....	16
1.4 Vplyv žiarenia na človeka.....	21
1.4.1 Ultrafialové žiarenie	22
1.4.2 Infračervené žiarenie.....	23
2. Cirkadiánnny rytmus	24
2.1 Gangliové bunky.....	28
2.2 Účinky modrého svetla na ľudský mozog	29
2.3 Modré svetlo a spánok	31
2.4 Modré svetlo a psychika	36
2.5 Svetelná terapia a simulácia úsvitu	37
3. Systémy pro-kognitívneho osvetlenia	39
3.1 Denné osvetlenie	39
3.2 Požiadavky na pro-kognitívnu osvetľovaciu sústavu	42
3.2.1 Výskum vplyvu pro-kognitívneho osvetlenia na študentoch Gymnázia Na Pražacce	48
3.3 Osvetľovacie systémy používané v praxi	49
3.3.1 Sharp Tiger Zenigata	50
3.3.2 Toshiba TRI-R.....	52
3.3.3 Spectrasol	53
3.3.4 Philips Hue	55
3.3.5 Ikea Trådfri.....	57

3.3.6	Vitae Light.....	58
4.	Návrh testovania vplyvu svetla na kognitívny výkon.....	61
4.1	Požiadavky	61
4.2	Analýza požiadaviek	61
4.3	Návrh testovania.....	64
	Záver	77
	Zdroje.....	80

Zoznam symbolov a skratiek

Symbol (skratka)	Názov
LED	Dióda emitujúca svetlo
T_c	náhradná teplota chromatickosti
CIE	Medzinárodná komisia pre osvetľovanie
lm	lumen
lx	lux
W	watt
K	kelvin
CZK	česká koruna (peňažná mena)
EUR	euro (peňažná mena)
nm	nanometre
$V(\lambda)$	krivku pomernej spektrálnej citlivosti oka normálneho fotometrického pozorovateľa
IR	infračervené žiarenie
UV	ultrafialové žiarenie
PRC	krivka fázovej odpovede
ipRGC	vnútorné fotosenzitívne sietnicové gangliové bunky
IoT	internet vecí
UGR	oslňenie
RGB	červeno-zeleno-modrá LED
DALI	rozhranie pre ovládanie osvetlenia
DSI	protokol pre ovládanie osvetlenia
DPH	daň z pridanej hodnoty

Zoznam obrázkov

Obr. 1: Rez ľudským okom. [19].....	15
Obr. 2: T_c prezentovaná pomocou žiaroviek. [27].....	17
Obr. 3: Spektrum elektromagnetického žiarenia. [28].....	18
Obr. 4: Spojité a nespojité spektrum svetelného zdroja. [29].....	19
Obr. 5: Relatívna spektrálna citlivosť ľudského zraku. [2]	20
Obr. 6: Príklad periodicity niektorých telesných funkcií. [4]	24
Obr. 7: Príklady zmien vo fyziológii a správaní u človeka vplyvom cirkadiálneho rytmu. [31].	25
Obr. 8: Umiestnenie suprachiazmatického jadra. [15]	26
Obr. 9: Krivka fázovej odpovede - PRC (Phase Response Curve). [6]	27
Obr. 10: Zobrazenie cirkadiálneho rytmu. [19]	28
Obr. 11: Grafické znázornenie nelineárnej závislosti potlačenia melatonínu na intenzite osvetlenia.	33
Obr. 12: Filtrácia modrej zložky svetla na mobilnom zariadení značky Apple.	34
Obr. 13: Okuliare blokujúce 100% modrej zložky svetla (informácia predajcu).	35
Obr. 14: Okuliare značky AYO emitujúce svetlo. [25]	36
Obr. 15: Liečba SAD pomocou svetelnej terapie. [7].....	37
Obr. 16: Simulátor úsvitu. [23]	38
Obr. 17: Svetlovod. [26]	41
Obr. 18: Mikrožalúzie pod elektrónovým mikroskopom. [32].....	42
Obr. 19: Percentuálny podiel teplej a studenej bielej potrebnej pre dosiahnutie požadovanej náhradnej teploty chromatickosti. [30].....	51
Obr. 20: Spektrálne zloženie laditeľného bieleho LED zdroja Tiger Zenigata od spoločnosti Sharp. [30]	51
Obr. 21: Spektrum TRI-R technológie od spoločnosti Toshiba v porovnaní so slnečným spektrom. [34].....	52

Obr. 22: Spektrálne zloženie obyčajného LED osvetlenia (vľavo hore), slnečného žiarenia (vpravo hore) a pro-kognitívneho osvetlenia značky Spectrasol (dole). [35] ...	54
Obr. 23: Balíček White and Color Ambience rady Hue od spoločnosti Philips. [36]	56
Obr. 24: 806 lm LED zdroj Ikea Trådfri spolu s diaľkovým ovládaním a stmievačom. [37].....	58
Obr. 25: LED zdroj Vitae Light a prenajímateľná lampa s klipom. [38]	60
Obr. 26: Sada 8 W LED zdrojov od spoločnosti Philips s $T_c = 2700\text{ K}$ a svetelným tokom 806 lm.	66
Obr. 27: Formulár d2 testu. [37]	70
Obr. 28: Šablóny pre vyhodnotenie d2 testu. [37].....	70

Úvod

V súčasnosti už vieme, že vplyv svetla na nielen ľudský organizmus je nezanedbateľný. Nasvedčujú tomu mnohé štúdie, ktoré zároveň podnietili záujem širšej laickej ale aj odbornej verejnosti o túto problematiku. Výsledkom snahy riešenia tejto problematiky sú osvetľovacie sústavy berúce do úvahy vplyv svetla na človeka. Táto diplomová práca sa bude zaoberať konkrétne vplyvom svetla na kognitívne funkcie človeka. V niektorých kruhoch sú tieto osvetľovacie sústavy známe pod pojmom biodynamické osvetľovanie alebo aj human centric lighting, pričom tieto pojmy sú skôr obchodnými názvami, než odborným pomenovaním. Tak isto sa môžeme stretnúť s pojмами cirkadiánne, smart alebo pro-kognitívne osvetľovanie. Medzinárodná komisia pre osvetľovanie CIE ako uznávaná autorita, však tento typ osvetľovania, ktorý má za snahu pozitívne ovplyvňovať vizuálne aj nevizuálne pôsobenie svetla na ľudský organizmus, jednotne nazvala *integratívnym osvetľovaním*.

Vplyv svetla na organizmus môže byť pozitívny ale aj negatívny a v tejto práci bude poukázané na oba aspekty a zároveň na to ako ich využiť v prospech ľudí, konkrétne pre zvýšenie ich kognitívneho výkonu. Pre správne pochopenie vplyvu svetla na ľudský organizmus je potrebné pochopiť ako funguje zrakový systém u človeka, čo ho ovplyvňuje a ako tieto zistenia môžeme využiť v náš prospech. Tieto zistenia sú dôležité aj pre návrh správnej osvetľovacej sústavy, ktorá odpovedá požiadavkám a potrebám jednotlivcov vzhľadom na ich individuálne potreby a potrebný kognitívny výkon.

1. Svetlo a človek

V tejto kapitole bude prebraná problematika spracovania svetelného signálu zrakovým systémom človeka ako aj najdôležitejšie typy žiarenia, ktoré k nám prenikajú z najvýznamnejšieho prírodného zdroja žiarenia – Slnka. Na prvý pohľad sa môže zdať, že táto problematika nemá svoje miesto v tejto práci, avšak pochopenie aspoň základných mechanizmov je kľúčové pre pochopenie dôležitej úlohy, ktoré tvorí svetlo v našom každodennom živote; pre inžiniera svetelnej techniky je to zasa potrebné z hľadiska návrhu vhodného osvetľovacieho systému, v ktorom je v hlavnej úlohe človek resp. jeho cirkadiánnny rytmus.

1.1 História vplyvu svetla na organizmy

V skorých dobách boli ľudia zvyknutí na prirodzené slnečné svetlo. Poloha Slnka na oblohe riadila našim predkom ich život. Jeho intenzita sa menila v závislosti od časti dňa ale aj ročného obdobia. Ich biorytmus bol zosynchronizovaný s východom a západom Slnka a jediným zdrojom svetla v noci bol svit Mesiaca alebo oheň, či už vo forme sviečky alebo plynovej lampy. Tieto zdroje však neboli natoľko intenzívne, aby dokázali vo veľkej miere ovplyvniť nočný život ľudí. Prelom nastal pri vynáleze žiarovky T. A. Edisonom v roku 1879, ktorá umožnila továrňam pracovať aj na nočné zmeny a zároveň umožnila ľuďom žiť resp. pracovať aj počas noci. Paradoxne s rozvojom elektrického osvetlenia ale aj samotnej elektrifikácie budov, sa budovy stavali väčšie, vyššie a komplexnejšie, čo dalo voľný priebeh umelému osvetleniu a obmedzilo priebeh prirodzeného svetla, nakoľko dôkazy o benefitoch prirodzeného osvetlenia pred umelým boli nedostatočné. Tieto udalosti postupne viedli k nevyhnutnému uvedomeniu si vplyvu svetla na organizmy. [3]

Znalosť vplyvu svetla na organizmy má veľa zdrojov, pričom prvé z nich možno datovať až do 17. storočia. Od práce Johanna Keplera z roku 1604, ktorá vysvetľuje fungovanie ľudského oka, cez Cohnovu prácu z roku 1883, v ktorej načrtol koreláciu medzi nedostatočným denným osvetlením a krátkozrakosťou u detí, až po počiatky 20. rokov 20. storočia, kedy sa prejavili snahy modernistických architektov, ako bol Le Corbusier, o zakomponovanie denného osvetlenia do budov škôl, nemocníc ako aj

obytných domov. Významným menom v obore sledovania cirkadiánnych rytmov bol aj Jean Jacques d'Ortois de Mairan, ktorý v 18. storočí uskutočnil experiment pri ktorom odpozoroval, že otváranie kvetov Citlivky obyčajnej (*Mimosa pudica*) počas dňa a ich zatváranie počas noci pretrvávajú aj po jej umiestnení do tmy, čo jednoznačne naznačuje určitý rytmus resp. biologické hodiny, ktorými sú pohyby listov spúšťané. O storočie neskôr Augustin Pyramus de Candolle tento experiment zopakoval, pričom zistil, že tieto pohyby síce korelujú so striedaním dňa a noci, avšak s 22 až 23 hodinovou periódou, namiesto 24 hodinovej periódy striedania dňa a noci. Napriek týmto objavom vedci odmietali uznať myšlienku vnútorných hodín v živých organizmoch a radšej podporovali existenciu vonkajšieho „faktoru X“ prepojeného s rotáciou Zeme. Táto teória pretrvávala až do polovice 20. storočia, kedy vznikol nový vedný obor chronobiológia; štúdium periodických javov vo všetkých živých organizmoch v závislosti na cykloch Slnka a Mesiaca.[4]

Vplyv svetla na rastliny si všimol aj John Ott, priekopník v tzv. „time-lapse“ fotografii, čo je možno popísať ako zrýchľovanie nepatrných pohybov za pomoci fotografií fotených vo veľkých časových intervaloch. V tomto prípade sa jednalo o sledovanie pohybu rastlín pri zmene osvetlenia a teploty. A práve zmena farebných filtrov osvetlenia, ako si Ott všimol, mala niekedy väčší efekt než aplikácia rôznych látok týmto rastlinám. Vďaka svojej práci bol dokonca v roku 1971 pozvaný prednášať seminár vedcom zodpovedným za dizajn prvej vesmírnej stanice Spojených štátov amerických. Konkrétne sa jednalo o problém pestovania zeleniny na palube tejto vesmírnej stanice. [16]

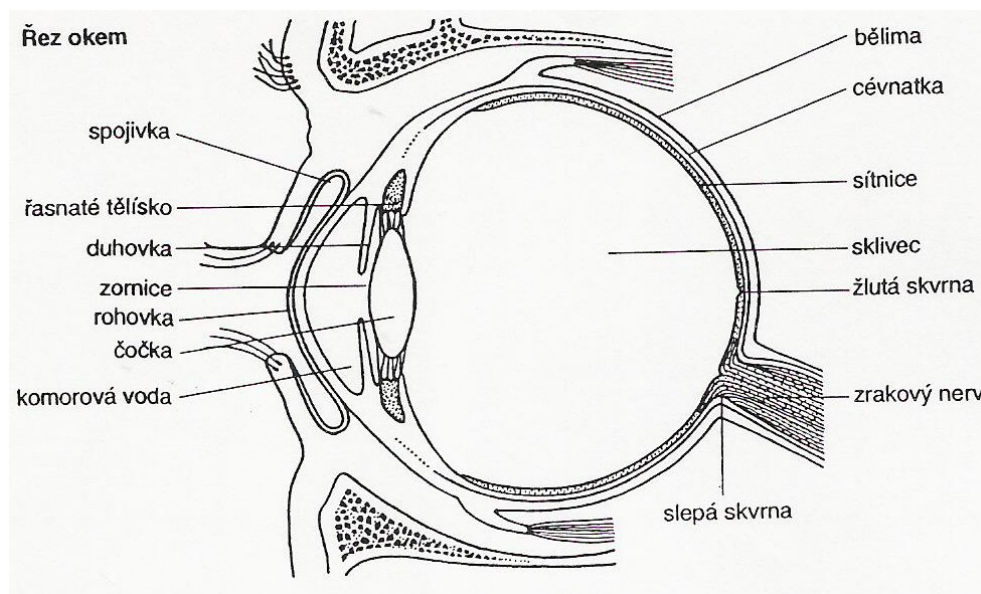
Jeden z najvýznamnejších dôkazov o vplyve svetla na človeka možno považovať udelenie Nobelovej ceny za medicínu Finsenovi v roku 1903, ktorý dokázal úspešne liečiť lupus vulgaris, ktorý spôsobuje baktéria tuberkulózy, práve za pomoci slnečného svetla. Podobným jednoznačným dôkazom je aj Nobelova cena za fyziológiu alebo medicínu, ktorú v roku 2017 obdržali vedci Hall, Rosbach a Young za ich objav molekulárnych mechanizmov, ktoré kontrolujú cirkadiánne rytmy.

Ako je možné vidieť, dôkazy o vplyve svetla resp. cyklickom striedaní dňa a noci, je možné sledovať naprieč modernou históriou ľudstva. V ďalšej kapitole bude prebraná problematika spracovania svetelného signálu zrakovým ústrojenstvom človeka.

1.2 Oko ako snímač

Ľudské oko je jedným z najkomplexnejších ľudských orgánov. Pre lepšiu predstavu môžeme funkciu jeho jednotlivých častí analogicky popísať k častiam fotoaparátu. Rohovka a šošovka tvoria objektív (rohovka vonkajší a šošovka vnútorný), dúhovka funguje ako clona regulujúca množstvo vpusteného svetla a sietnica plní úlohu svetlocitlivého filmu. A práve na sietnici sa nachádzajú bunky dôležité pre vznik nervového vzruchu, ktorý vznikne pomocou biochemických reakcií a putuje ďalej do mozgu, kde je z neho vytvorený obraz. Týmto bunkami sú tyčinky a čapíky. Tyčiniek sa tu nachádza približne 130 miliónov a sú citlivejšie na svetlo než na jeho farby a tým nám umožňujú videnie za šera tzv. skotopické videnie. Naopak čapíkov je len 7 miliónov ale umožňujú nám farebné tzv. fotopické videnie. Pri nízkych hodnotách osvetlenia dochádza k tzv. mezopickému videniu, čo je kombinácia skotopického a fotopického videnia.

Na sietnici sa nachádzajú dve miesta s diametrálne odlišnými vlastnosťami, ktoré sú dané koncentráciou tyčínok a čapíkov. Najhustejšie zoskupenie čapíkov, nazývané žltá škvrna, s priemerom 1 mm, je miesto s najostrejším videním. Tyčinky tu sú oproti čapíkom v menšine. Naopak slepá škvrna je miesto, vzdialené približne 5 mm od žltej škvrny, kde sa nenachádzajú ani tyčinky ani čapíky, pretože práve v tomto mieste do oka vstupuje zrakový nerv. [13,18]



Obr. 1: Rez ľudským okom. [19]

Nasleduje krátky popis najzákladnejších častí ľudského oka:

- **Očná bulva (bulbus oculi)** - má približne guľovitý tvar pričom najdlhší je axiálny rozmer. Je na ňu napojených šesť oko-hybných svalov, ktoré ňou pohybujú tak aby obraz dopadal na sietnicu v žltej škvrne.
- **Bielko (sclera)** – tuhá biela väzivová blana (u detí namodralá, u starších ľudí nažltlá vplyvom kvapôčok tuku), pokrýva 80% povrchu oka a vpredu prechádza do rohovky.
- **Rohovka (cornea)** – je inervovaná (nachádzajú sa v nej nervové vlákna) a veľmi citlivá na dotyk, avšak nenachádzajú sa v nej cievy (živiny prijíma zo vzduchu). Je vyklenutejšia než očné bielko, podobne ako sklíčko na hodinkách a svetlo sa v nej po dopade na oko láme najväčšmi.
- **Dúhovka (iris)** – má tvar kruhového terčiku, pričom otvor uprostred nej sa nazýva zornica. Tá sa pomocou kruhovite usporiadanej svaloviny zväčšuje alebo zmenšuje, čím reguluje množstvo prepusteného svetla a zároveň zabezpečuje, aby lúče svetla do oka nevnikli inou cestou.
- **Šošovka (lens)** – je priehľadná, dvojito vypuklá spojka s viac zakrivenou zadnou plochou, ktorá láme lúče tak, aby ich ohnisko bolo v jednom bode na sietnici a tým vznikol ostrý obraz.
- **Sietnica (retina)** – je tenká vrstva na vnútornej strane oka na ktorej sa nachádzajú svetlo-citlivé receptory, ktoré pomocou biochemických reakcií vytvárajú nervové vzruchy v mozgu pretvorené na obraz.
- **Sklovec (corpus vitreum)** – je to rôsolovitá priehľadná hmota vyplňujúca vnútorný priestor očnej bulvy o stálom tlaku a tým aj udržiava jeho stály tvar.
- **Cievnatka (choroidea)** – je to vrstva nachádzajúca sa medzi bielkom a sietnicou. Je bohatá na cievy a tým zabezpečuje výživu sietnice. [5]

1.3 Svetlo ako zdroj informácie

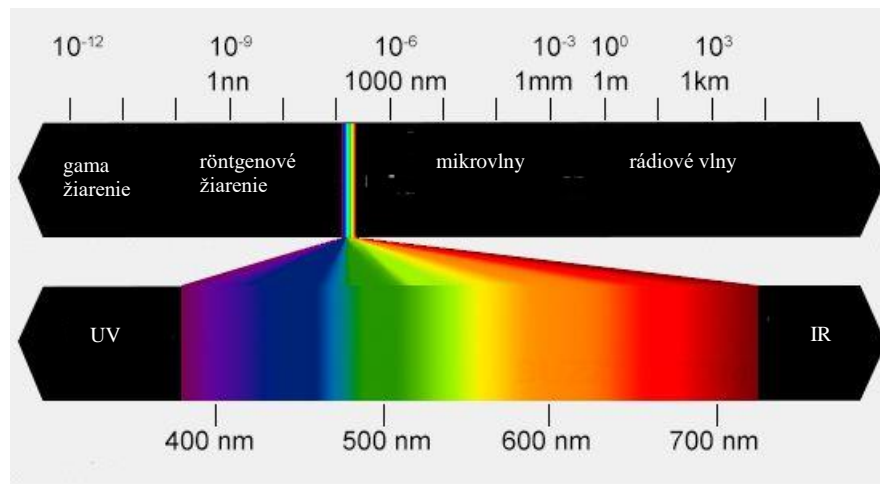
Ľudské oko je schopné zachytávať elektromagnetické vlnenie o vlnovej dĺžke približne od 380 nm do 780 nm, pričom vektor intenzity elektrického poľa a magnetickej indukcie sú na seba kolmé. Toto spektrum nazývame svetlom a rôzne

vlnové dĺžky tohto svetla vnímame ako jeho farbu. Subjektívne môžeme tieto farby rozdeliť na teplé, kam spadajú farby žltá, oranžová a červená, a studené kam patrí fialová, modrá a zelená farba. Pojem farba je však dvojznačný nakoľko ním môžeme popisovať buď farbu svetla, kedy hovoríme o chromatickosti, alebo o farbe materiálov, označovanej ako kolorita. Chromatickosť je daná spektrálnym zložením zdroja žiarenia a kolorita je daná ako zložením zdroja, tak aj spektrálnou odraznosťou resp. priepustnosťou materiálu. Dôležitým faktorom z hľadiska osvetľovacej techniky je, že svetlá rôzneho spektrálneho zloženia môžu budiť dojem rovnakej chromatickosti, avšak podanie farieb bude diametrálne odlišné (obr. 4). Spektrálne zloženie svetla sa dá vyjadriť rôznymi spôsobmi, ako napríklad súradnicami v kolorimetrickom trojuholníku CIE alebo teplotou chromatickosti. Teplota chromatickosti svetla svetelného zdroja udáva teplotu absolútne čierneho telesa v Kelvinoch, pri ktorej svieti žiariteľ svetlom rovnakej chromatickosti. Pre zdroje, ktoré nie sú zdrojom teplotného žiarenia, sa udáva tzv. náhradná teplota chromatickosti T_c . Pre lepšiu predstavu posluži obr. 2, na ktorom sú zobrazené teploty chromatickosti pomocou žiarovky v rozmedzí 1000 K až 10 000 K s krokom 1000 K. Môžeme pozorovať, že so zvyšujúcou sa teplotou chromatickosti sa farby stávajú chladnejšími resp. je v nich väčší podiel modrej zložky. [2]



Obr. 2: T_c prezentovaná pomocou žiaroviek. [27]

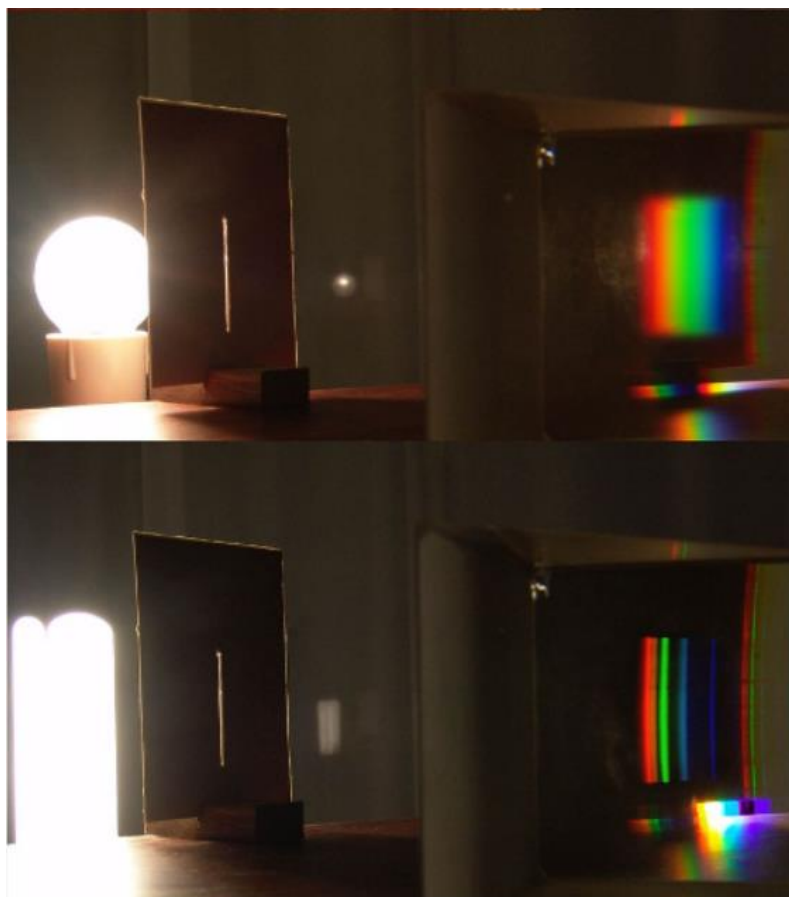
Jedným z problémov svetla sa môže zdať dualita častice a vlnenia, ktorá vraví, že svetlo je možné popísať ako vlnenie ale aj ako časticu, v závislosti na spôsobe pozorovania a konkrétnom experimente. Vo svetelnej technike je však tento problém irelevantný, nakoľko vo svetelnej technike je viac než postačujúce považovať svetlo za vlnenie; ako časticu ho možno vnímať pri rýchlostiach blízkyh rýchlosti svetla alebo v silných gravitačných poliach.



Obr. 3: Spektrum elektromagnetického žiarenia. [28]

Svetlo, či už prirodzené alebo každodenne používané umelé osvetlenie, sa nikdy neskladá z jednej monochromatickej vlny. Jedná sa o sumu viacerých týchto monochromatických vln s rôznymi amplitúdami a vlnovými dĺžkami. Táto suma sa nazýva elektromagnetické spektrum. Tieto vlny sa klasifikujú pomocou vlnových dĺžok, v zostupnom poradí nasledovne (viď. obr. 3):

- rádiové vlny,
- mikrovlny,
- infračervené žiarenie (IR),
- viditeľné svetlo,
- ultrafialové žiarenie (UV),
- röntgenové žiarenie,
- gama žiarenie.



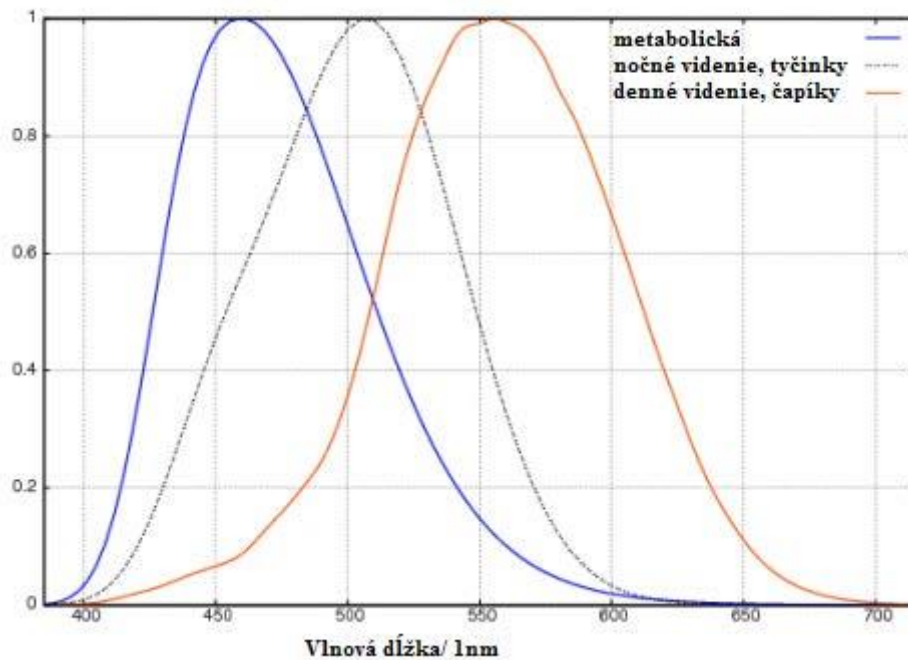
Obr. 4: Spojité a nespojité spektrum svetelného zdroja. [29]

Svetelné zdroje môžeme rozdeliť podľa spojitosti ich spektra a to na zdroje:

- so spojitým spektrom – jedná sa o teplotné zdroje či už umelé (žiarovka na obr. 4) alebo prírodné (Slnko). Spektrum týchto svetelných zdrojov tvorí jedna spojitá plná čiara obsahujúca všetky farby.
- s nespojitým (čiarovým) spektrom – tu patria už len umelé zdroje svetla ako napr. LED alebo výbojky. Ich spektrum tvoria len určité farby resp. určité intervaly vlnových dĺžok prislúchajúce daným farbám.
- s monochromatickým svetlom – tieto svetelné zdroje vyžarujú len jednofarebné svetlo s úzkym intervalom vlnových dĺžok. Typickým príkladom sú napríklad lasery. [2]

Z obr. 3 môžeme vidieť, že najkratšie vlnové dĺžky vo viditeľnom spektre sú vnímané ako fialové svetlo. Kratšie vlnové dĺžky sú už považované za ultrafialové žiarenie. Naopak najdlhšie vlnové dĺžky sú vnímané ako červené svetlo a vlnové dĺžky

nad touto hranicou spadajú do spektra infračerveného žiarenia. Na obr. 3 môžeme vidieť, že viditeľné spektrum svetla tvorí len malú časť z celkového spektra žiarenia.



Obr. 5: Relatívna spektrálna citlivosť ľudského zraku. [2]

Ľudské oko nie je rovnako citlivé na všetky vlnové dĺžky. Najväčšiu citlivosť pri bežnom dennom fotopickom videní má oko v okolí 555 nm, čo odpovedá zelenému svetlu. Táto citlivosť sa však líši aj od človeka ku človeku. Vznikla teda potreba určitej šandardizácie tejto citlivosti pre rôzne výpočty. Preto CIE (Medzinárodná komisia pre osvetľovanie) určila krivku fotopického videnia ako krivku pomernej spektrálnej citlivosti oka normálneho fotometrického pozorovateľa $V(\lambda)$ s vrcholom práve v 555 nm. Táto krivka je vyobrazená na obr. 5 oranžovou farbou. Z hľadiska riadenia cirkadiánneho rytmu je dôležitá aj tzv. metabolická krivka, kam spadajú najmä vlnové dĺžky v rozmedzí približne 430 nm až 500 nm, ktoré odpovedajú modrému svetlu, ktoré je ako bude neskôr ukázané, kriticky dôležité v otázke vplyvu na človeka resp. na jeho cirkadiánny rytmus. Šedá čiarkovaná krivka reprezentuje relatívnu citlivosť oka na vlnové dĺžky pri tzv. skotopickom videní. Maximálna citlivosť pri tomto type videnia je na vlnovej dĺžke 513 nm. Pri tomto type videnia je pozorovateľ farboslepý. [15]

1.4 Vplyv žiarenia na človeka

V predchádzajúcej kapitole je zhrnutý vplyv svetla na človeka z pohľadu jeho hlavnej úlohy – schopnosti vizuálne vnímať naše okolie. Svetlo má ešte dva ďalšie spôsoby akými vplýva na človeka – jeho absorpcia pokožkou pokožku a jeho vplyv na cirkadiánný rytmus. Dôležitosť dostatočného množstva svetla v detskom veku potvrdzuje fakt, že sa vďaka nemu dokáže správne vyvíjať axiálny rozmer oka tak, aby bol obraz premietaný presne na sietnicu. Svetlo tak isto ovplyvňuje náš cirkadiánný rytmus, pomocou zmeny sekrécie určitých hormónov, ako napríklad melatonínu, pri ktorého zvýšenej sekrécii sa telo ukladá ku spánku, alebo kortizolu, ktorý telu pomáha telu byť plne pri vedomí a v strehu. Nakoniec svetlo čiastočne ovplyvňuje produkciu neurotransmiterov ako je dopamín a serotonín. [2,3,15]

Otázke cirkadiánnych rytmov bude venovaná nasledujúca kapitola. Najskôr bude uvedený vplyv jednotlivých vlnových dĺžok na ľudský organizmus, konkrétne na oko. Niektoré vlnové dĺžky oko pohlcuje rozkladom proteínov, na ktoré je spotrebovaná energia. Pri väčších dávkach nevhodného žiarenia dochádza k zvýšeniu teploty a tlaku, čo môže viesť až k trvalému poškodeniu oka. Napríklad vlnové dĺžky v rozmedzí 100 – 315 nm sa absorbujú v rohovke a rozptýlia sa v komorovej vode. Žiarenie od 315 nm do 400 nm sa absorbuje prevažne v šošovke a žiarenie vo vlnových dĺžkach medzi 400 nm až 1400 nm prechádza šošovkou na sietnicu a pri veľkej intenzite môže spôsobiť jej poškodenie. Žiarenie nad 1400 nm je absorbované v rohovke a spôsobuje silné slzenie a zvyšovanie tlaku a teploty komorovej vody. [2,3,15]

Platí, že čím kratšia vlnová dĺžka, tým väčšiu energiu nesie. Z tohto hľadiska je možné žiarenie rozdeliť na žiarenie ionizujúce a žiarenie neionizujúce. Ionizujúce žiarenie má energiu dostatočne veľkú na ionizáciu atómov alebo molekúl; neionizujúce je presným opakom. Za pomyselnú hranicu pre ionizujúce žiarenie možno pokladať 100 nm. Jedná sa teda o vysokoenergetické röntgenové žiarenie, žiarenie pri rádioaktívnom rozpade alebo kozmické žiarenie. Takéto žiarenie je ale možné vytvoriť aj umelo napr. v urýchľovači častíc, röntgene alebo pomocou umelo vytvorených nestabilných prvkov napr. plutonium. Pre všetky živé organizmy má takéto žiarenie negatívne účinky. Ak je živý organizmus vystavený dlhodobo slabému resp. krátkodobo silnému ionizujúcemu

žiareníu, dochádza ku ionizácii častíc buniek, ktoré sa stávajú reaktívnymi a vedú ku chemickým reakciám, ktoré sa končia buď smrťou alebo mutáciou. [2,3,15]

Z obr. 3 vidíme, že spektrum elektromagnetického žiarenia pozostáva aj z iných vlnových dĺžok, než len z tých, ktoré je ľudský organizmus schopný vnímať okom. V otázke vplyvu rôznymi druhmi žiarenia sa nám oplatí zaoberať sa len tými typmi žiarenia, ktoré vyžaruje Slnko ako najväčší prírodný zdroj elektromagnetického žiarenia na Zemi, resp. tými typmi žiarenia, ktoré zo Slnka dopadajú na zemský povrch. Z celého polychromatického spektra vyžarovaného Slnkom preniká na Zem približne 50%; 30% odrazí atmosféra a 20% pohltí. Z týchto 50% je 7% ultrafialové, 47% viditeľné a 46% infračervené žiarenie. Súhrnne sa tieto 3 typy žiarenia nazývajú optickým žiarením. [2,3,15]

1.4.1 Ultrafialové žiarenie

UV (UltraViolet) žiarenie má vlnovú dĺžku v rozmedzí približne 10 nm až 400 nm, čiže z hľadiska vlnových dĺžok sa nachádza pod viditeľným spektrom. Najvýznamnejším prírodným zdrojom je samozrejme Slnko, ale aj elektrický oblúk, ortuťové výbojky a čierne svetlo. Jeho vplyv na ľudí môže byť pozitívny alebo negatívny. To je v závislosti od účelu na aký je žiarenie použité ako aj dĺžke jeho pôsobenia. Napríklad UVC žiarenie poškodzuje DNA, avšak na druhú stranu ničí baktérie a sterilizuje povrchy. Niektoré materiály vystavené dlhodobému pôsobeniu UV žiarenia strácajú svoju farebnú pestrosť a degradujú. U ľudí vyvoláva UV žiarenie v menších dávkach tvorbu vitamínu D a hormónu serotonínu, ktorý zlepšuje náladu, avšak pri dlhšom pôsobení má karcinogénne účinky, ktoré sa môžu prejaviť ako zhubný nádor na koži alebo v oku. Pred jeho neprimeraným pôsobením sme chránení ozónovou vrstvou, inak by život na Zemi nebol možný.

Môže byť rozdelené do 3 podkategórií:

- UVA (315 – 400 nm)
- UVB (280 – 315 nm)
- UVC (100 – 280 nm)

UVA žiarenie sa využíva najmä v priemyselných odvetviach kvôli schopnosti urýchľovať chemické reakcie pri rôznych procesoch. Tak isto dokáže vyvolať

luminiscenciu, čo je využívané najmä u žiaroviek. Elektrický výboj v plyne generuje UVA žiarenie, ktoré je pri dopade na vrstvu luminoforu na vnútornej strane trubice transformované na svetlo.

UVB žiarenie je tým typom žiarenia, ktoré spôsobuje opálenie, nakoľko je pokožka na tento typ žiarenia najviac citlivá. Typickým umelým zdrojom tohto žiarenia je tzv. horské slnko.

UVC žiarenie má germicídne účinky; je schopné usmrcovať mikroorganizmy, baktérie a vírusy. Vďaka tomu sa využíva v zdravotníctve (dezinfekcia operačných sál, sterilizácia nástrojov, atď.), v potravinárstve (dezinfekcia obalov a kvapalín) a všade kde je potrebné udržiavať sterilné prostredie. [5,12]

1.4.2 Infračervené žiarenie

Spektrum IR (InfraRed) žiarenia, je v intervale 790 nm až do 1 mm. Podobne ako u UV žiarenia jeho zdrojom môže byť Slnko, elektrický oblúk a špeciálny zdroj IR žiarenia, ale aj každé zahriate teleso. IR žiarenie má vďaka svojej schopnosti prenášať teplo veľké využitie, či už v priemyselnej alebo lekárskej sfére.

Obdobne ako u UV žiarenia, môžeme aj IR žiarenie rozdeliť do troch skupín:

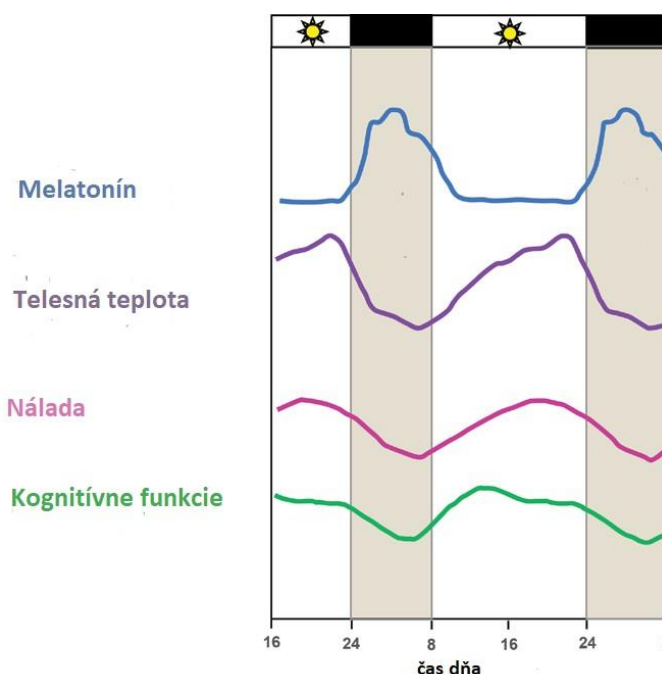
- IRA (780 – 1400 nm)
- IRB (1400 – 3000 nm)
- IRC (3000 nm – 1 mm)

IRA žiarenie je používané napríklad v zdravotníctve pri urýchl'ovaní rehabilitačného procesu pacientov. Toto žiarenie preniká hlboko do tkaniva a rozširuje cievy, čím vďaka zvýšenému prietoku krvi urýchl'uje hojenie. Avšak väčšia koncentrácia akéhokoľvek typu IR žiarenia môže spôsobiť popálenie alebo až vznik zákalu na oku. [5,12]

2. Cirkadiánnny rytmus

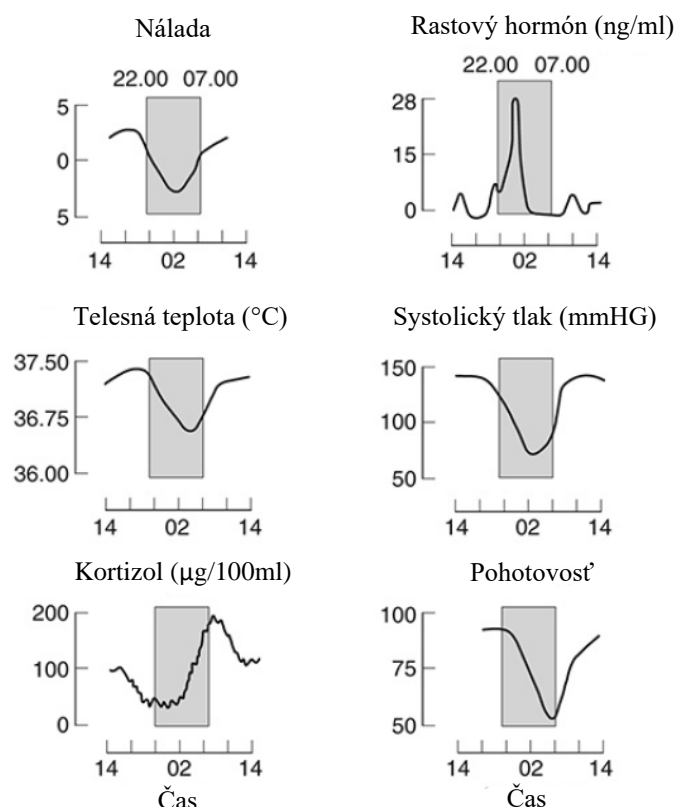
V predchádzajúcich kapitolách bolo odprezentované ako človek vníma svetlo a aký ma neho vplyv, či už v zmysle vizuálneho alebo nevizuálneho pôsobenia. V tejto kapitole bude prebraný vplyv svetla na človeka, a to najmä v otázke jeho vplyvu na cirkadiánnny rytmus. Ten má vplyv na celú radu procesov odohrávajúcich sa v našom tele a svetlo má dôležitú úlohu v jeho správnom fungovaní a synchronizácii s okolitým prostredím. [30]

Cirkadiánnny rytmus môžeme popísať ako zmeny vo fyziológii a správaní človeka. Existuje hypotéza, že tento rytmus sa vyvinul aby človek dokázal prispôbiť a optimalizovať svoje správanie a fyziológiu organizmu periodicky sa meniacemu okolitému prostrediu, ktoré je podmienené rotáciou Zeme okolo vlastnej osy ako aj okolo Slnka. Hlavnou úlohou cirkadiánnneho rytmu teda je v čo najlepšej možnej miere pripraviť organizmus či už na aktivitu, psychickú aj fyzickú, alebo na regeneráciu. Nakoľko tento rytmus sa blíži, avšak nie dostatočne, 24 hodinovej perióde, musí byť tento systém synchronizovaný s periodicky sa meniacim prostredím človeka, či už pravidelným striedaním svetla a tmy alebo zmenami ročného obdobia.



Obr. 6: Príklad periodicity niektorých telesných funkcií. [4]

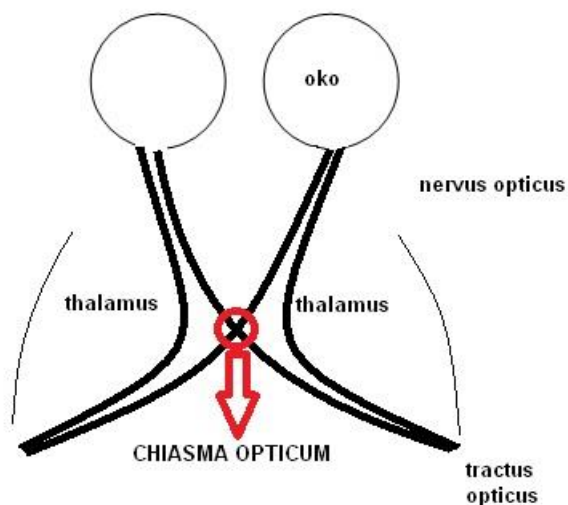
Prvé štúdie cirkadiánnych rytmov predpokladali, že človek na rozdiel od iných organizmov je relatívne necitlivý na svetlo a jeho cirkadiánnny rytmus bol viac ovplyvňovaný sociálnymi stopami. Avšak nedávne štúdie potvrdili opak a teda, že človek, podobne ako všetky organizmy je na svetlo citlivý a má vplyv na celú radu procesov v tele.



Obr. 7: Príklady zmien vo fyziológii a správaní u človeka vplyvom cirkadiánného rytmu. [31].

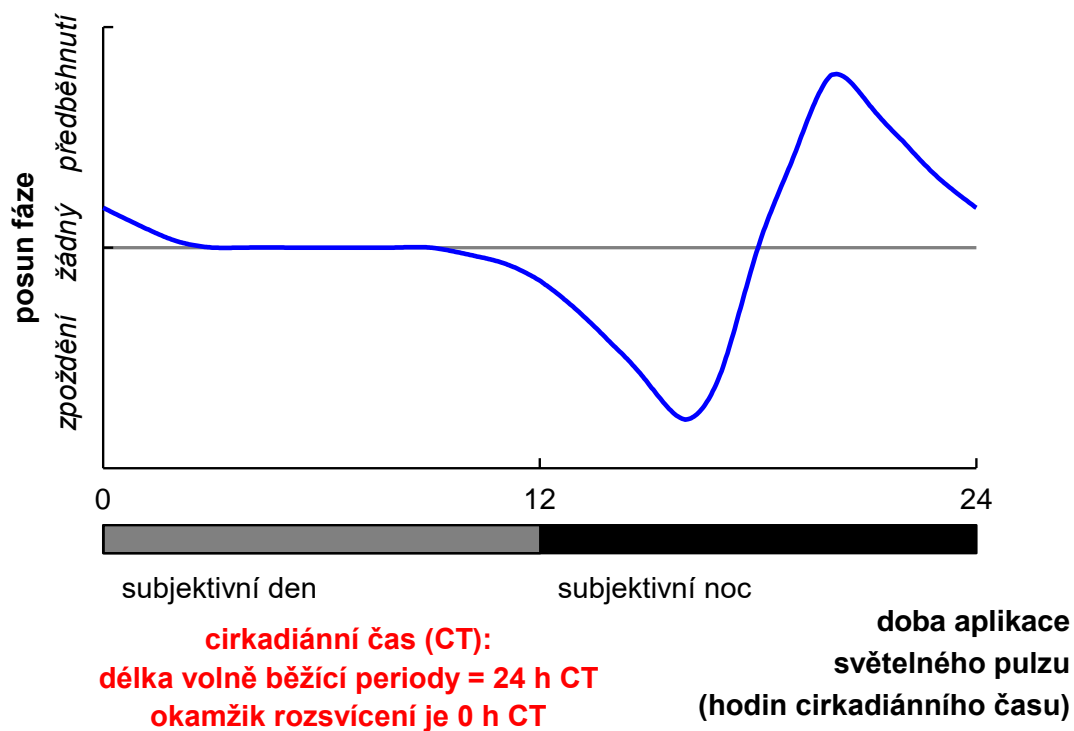
Ako už bolo spomenuté, cirkadiánnny rytmus človeka nie je presných 24 hodín. Vyplýva to už z jeho názvu; lat. *circa* znamená „približne“ a lat. *diem* znamená „deň“. Jeho trvanie kolíše v priemere medzi 23,9 a 24,5 hodinami. Bolo to zistené experimentom, kedy boli ľudia zavretí do tmavej miestnosti a ich biologické mechanizmy, ako napríklad teplota, zloženie krvi a moču, vykazovali periodicitu, ktoré však neboli synchronizované s 24 hodinovým cyklom striedania dňa a noci, ale mierne sa líšili. Nerovnaká doba periód biologických hodín a zemského dňa, je resetovaná pomocou tzv. *zeitgeberu* v preklade časovej stopy, čo možno považovať za zvýšenú hladinu svetla vo vonkajšom prostredí človeka. Táto synchronizácia je možná vďaka biologickým hodinám, ktoré sa nazývajú suprachiazmatické jadrá. Jedná sa o dva malé

zhluky približne 20 000 neurónov strategicky umiestnených v mieste kríženia očných nervov (chiasma opticum), ktoré nesú informáciu o svetle. [1,15,22]



Obr. 8: Umiestnenie suprachiasmatického jadra. [15]

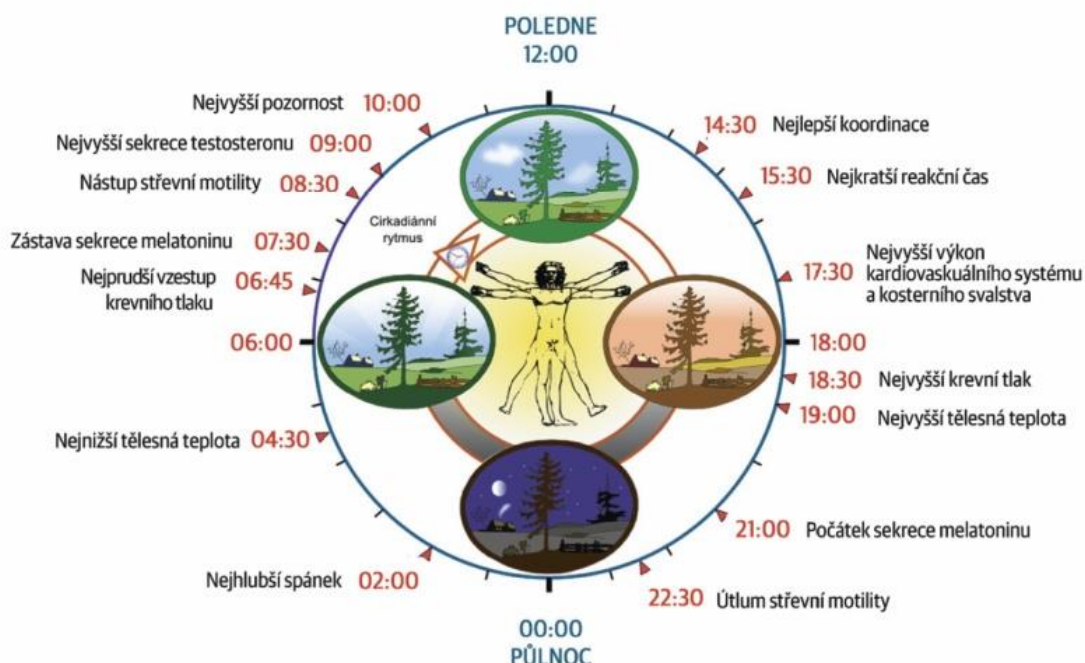
Tieto informácie ďalej riadia mnohé procesy v tele ako napríklad hladiny hormónov v krvi, telesnú teplotu, spánok a bdlosť. Dokonca aj imunitné funkcie nášho organizmu vykazujú cirkadiánnu periodicitu. Najdôležitejšiu úlohu pritom zohrávajú hormóny melatonín, spájaný so spánkom a telesnou regeneráciou a hormóny kortizol a adrenalín, ktoré sú zasa spájané so stresom, bdlosťou a pohybom. Dôležité je však podotknúť, že melatonín spánok nekontroluje. Je možné spať aj keď perióda spánku a vylučovania melatonínu sú vzájomne fázovo posunuté, avšak takýto spánok nie je pre človeka najprirodzenejší a neposkytuje mu také benefity a regeneráciu ako v prípade zosynchronizovania sekrécie melatonínu so spánkom. Jedným z najdôležitejších objavov je, že cirkadiánnny rytmus môže mať priame prepojenie na delenie resp. nedelenie buniek. Táto funkcia biologických hodín môže mať v dlhodobom časovom horizonte veľký dopad na nádorové ochorenia, čo je v podstate bujné delenie buniek, ktoré sa vymklo kontrole. Niet pochýb, že v budúcnosti bude tejto téme venovaná oveľa väčšia pozornosť. [15]



Obr. 9: Krivka fázovej odpovede - PRC (Phase Response Curve). [6]

Spôsob akým môže svetlo ovplyvňovať posun cirkadiálneho rytmu je zobrazený na obrázku 7 pomocou krivky fázovej odpovede. Jedná sa o grafické znázornenie veľkosti posunu cirkadiálneho rytmu v závislosti na čase, kedy je sietnica vystavená svetlu. Približne dve hodiny pred zvyčajným časom zaspánia, začína mať svetlo vplyv na fázový posun v zmysle oneskorenia cirkadiánnych rytmov. Čas vstávania a zaspávania sa teda oneskoruje. A tento efekt sa zväčšuje s postupujúcim časom, až do približne piatich hodín po zvyčajnom čase zaspánia, kedy fázové oneskorenie dosiahne svoj vrchol. Od tohto bodu začína mať vystavenie svetlu presne opačný efekt a to takmer hneď v najväčšej možnej miere. Cirkadiánnny rytmus a s ním aj čas vstávania a zaspávania sa posúva ku skorším časom než je obvyklé. Tento efekt pôsobenia svetla na posun cirkadiálneho rytmu odoznie približne 2 hodiny po zvyčajnom čase vstávania. Spôsob akým sa vyrovnávame s predbehnutím alebo oneskorením cirkadiánnych rytmov však nie je rovnaký. Vyšlo najavo, že ľudský organizmus sa lepšie vyrovnáva s oneskorením cirkadiálneho rytmus než s jeho predbehnutím. Najlepšie pozorovateľné to je pri „jet lagu“ – pásmovej nemoci. Problémy sa javia závažnejšie pri lete smerom

na východ než na západ, pretože pri smere na východ si ušetríme čas z doby trvania subjektívnej noci. [10,12]



Obr. 10: Zobrazení cirkadiánního rytmu. [19]

Na obrázku 6 je vyobrazený přibližný cirkadiánní rytmus člověka z pohledu počátků a útlmů fyziologických změn resp. maxím a miním, které tělo počas dne dosahuje. Řízení tohoto cirkadiánního rytmu má na svědomí další typ speciálních buněk, s názvem gangliové bunky. Obsahují protein s názvem melanopsin, čo je látka ktorá prenáša informáciu o svetle zo sietnice priamo do centra biologických hodín v suprachiazmatických jadrách. [3,31]

2.1 Gangliové bunky

Jedná sa o typ buniek, ktorých existencia bola potvrdená až v roku 2007. Prijímajú vstupy z tyčínok a čapíkov, pričom ich funkcia nie je funkciou vizuálnou, ale jedná sa o tzv. neobrazotvornú funkciu. Tieto funkcie možno definovať ako určité fyziologické procesy v mozgu a v tele, ktoré sa menia v závislosti od intenzity a doby vystavenia svetlu. V cudzojazyčnej literatúre sa môžeme stretnúť s názvom ipRGC (intrinsically photosensitive retinal ganglion cells) v preklade vnútorne fotosenzitívne sietnicové gangliové bunky. Melanopsín, ktorý tieto bunky produkujú, je zodpovedný za

potlačenie produkcie melatonínu, posun cirkadiálneho rytmu a šošovkového svetelného reflexu. [4]

Avšak nie každá vlnová dĺžka vyvolá rovnako veľkú biochemickú reakciu gangliových buniek. Gangliové bunky vykazujú najväčšiu citlivosť v intervale vlnových dĺžok približne od 450 nm do 480 nm, čo odpovedá práve modrému svetlu. Tyčinky majú vrchol pri 507 nm a čapíky pri 555 nm. V pokuse pod vedením amerického vedca Charlesa Czeisera z roku 1986 bola žena, ktorá mala zničené všetky tyčinky a čapíky, vystavená silnému ožiareniu modrým svetlom a výsledok bol prekvapujúci – žena spozorovala malý záblesk. Bol to práve signál z gangliových buniek, ktoré toto svetlo zaznamenali, aj keď ich citlivosť je v porovnaní s citlivosťou čapíkov a tyčiniek nízka. A práve táto necitlivosť sa ukázala ako prospešná. Vďaka nej totižto naše biologické hodiny nie sú také náchylné na krátke zmeny osvetlenia ako napríklad pri prejazde tunelom alebo náhlom zamračení oblohy. Reagujú až na postupné prirodzené stmievanie oblohy a teda aj postupne znižujúce sa množstvo modrej zložky svetla. [3,21]

2.2 Účinky modrého svetla na ľudský mozog

Kognitívny výkon u človeka môžeme definovať ako mentálnu schopnosť získavať, spracovávať, ukladať, vyhodnocovať a vyvolávať informácie pre potreby riešenia akýchkoľvek problémov. Môže sa pritom jednať o problémy jednoduchého charakteru ako napr. akým spôsobom preniesť tri predmety ak mám k dispozícii len svoje dve ruky až po najkomplexnejšie aktivity ako je riešenie náročných vedeckých výskumov. Tento výkon môžu ovplyvňovať aj ďalšie faktory ako sú subjektívny pocit bdlosti alebo a pohotovosti, pričom svetlo je schopné stimulovať aj tieto faktory. Ďalším dôležitým pojmom je pracovná pamäť. Je to časovo obmedzená pamäť, používaná na dočasné uloženie informácií pre ďalšie spracovanie. Svoju hlavnú úlohu tvorí pri rozhodovacích procesoch, uvažovaní a správaní. Nemala by byť zamieňaná s krátkodobou pamäťou, ktorá síce tiež časovo obmedzená, avšak tieto údaje neukladá za účelom ich priameho spracovania. Výkon pracovnej pamäte je kľúčový pre učenie a riešenie problémov. [30,31]

Výskum z roku 2016 pod vedením Okamota a Nakagawy študoval efekty rôznych vlnových dĺžok na pamäťové procesy na vzorke dvanástich subjektov vo veku dvadsať

až tridsaťjeden rokov. Bola vyhodnocovaná ich mozgová aktivita pomocou magnetoencefalografu, zatiaľ čo boli subjekty podrobené sluchovému Sternbergovmu pamäťovému testu. Počas 30 minút trvania testu boli subjekty vystavené dvom typom svetelných podmienok. V prvom prípade sa jednalo o zelené svetlo s vrcholom spektra na vlnovej dĺžke 520 nm a v druhom prípade išlo o modré svetlo so špičkou v 470 nm. Výsledky ukázali, že modré svetlo stimulovalo oblasti mozgu spájané s pracovnou pamäťou a pohotovosťou viac než zelené svetlo. Treba podotknúť, že obe tieto merania boli vykonávané počas dňa. Podobné výsledky boli dosiahnuté aj pri výskume z roku 1999 vedené Noguchim a Sakaguchim. V tomto prípade boli však namiesto monochromatických svetelných podmienok použité biele svetlá s náhradnou teplotou chromatickosti 3000 K a 5000 K. Svetlo s 5000 K stimulovalo nervový systém viac než svetlo s 3000 K, kvôli vyššiemu zastúpeniu vlnových dĺžok modrej zložky svetla. Podobne tomu bolo aj v ďalšom výskume z roku 2005 pod vedením Cajochena, kde bolo desať subjektov vystavených modrému svetlu a žltému svetlu vo večerných hodinách po dobu dvoch hodín. Pri vystavení modrému svetlu došlo ku redukcii vylučovania melatonínu a bolo zaznamenané aj zvýšenie telesnej teploty, tepu a subjektívnej úrovne bdlosti u subjektov. V prípade vystavenia žltému svetlu k takýmto fyziologickým zmenám nedošlo.

Vplyv na kognitívny výkon má nie len spektrum použitého svetla a jeho T_c , ale aj úroveň osvetlenia oka. Tomuto sa venoval výskum Smoldersa a spol. z roku 2012, na vzorke tridsiatichdvoch kancelárskych pracovníkov počas bežnej pracovnej doby. Bolo použité svetlo s $T_c = 4000$ K a bol meraný jeho vplyv pri dvoch rôznych úrovniach osvetlenia, konkrétne 200 lx a 1000 lx, po dobu jednej hodiny. Výsledky preukázali, že pri vyššej intenzite osvetlenia došlo ku skráteniu reakčných časov, vyššej úrovni bdlosti a zvýšenému tepu a to hlavne ku koncu jednej hodiny od počiatku vystavenia týmto svetelným podmienkam. Z týchto výsledkov jasne vyplýva, že svetelné podmienky, ktorým je človek vystavený počas bežnej pracovnej doby, tj. nie v tme a relatívne ďaleko od času spánku, pozitívne vplývajú na bdlosť, pohotovosť, kognitívny výkon a celkovú aktiváciu organizmu. V priestoroch kde je vyžadovaná vysoká miera sústredenia a kognitívnych schopností, ako sú napr. školy alebo laboratória, má vhodná osvetľovacia sústava neporovnateľne väčší dopad, či už na výsledky merania alebo na učebný proces. Viaceré štúdie potvrdili zlepšenie rýchlosti

čítania, koncentrácie a porozumenia textu. Študenti vystavený intenzite osvetlenia 1060 lx s náhradnou teplotou chromatickosti 5800 K vykazovali zlepšenie vyššie spomínaných funkcií, pričom navyše robili menšie množstvo chýb, v porovnaní s výsledkami namieranými pod intenzitou osvetlenia 300 lx s náhradnou teplotou chromatickosti 4000 K. Je dôležité podotknúť, že to aký má svetlo vplyv nezávisí len od jeho spektrálneho zloženia, T_c a úrovne intenzity osvetlenia oka ale aj od histórie osvetlenia, tj. svetelné podmienky predchádzajúce začiatku merania, načasovanie a aj doba vystavenia. [30,31]

Ako už bolo spomenuté, účinok svetla závisí na jeho parametroch (intenzita, spektrum, doba vystavenia), ale zároveň aj na individuálnych vlastnostiach jedinca (vek, pohlavie, chronotyp, genetika, životný štýl, atď.). Konkrétne aspekt životného štýlu je najlepšie pozorovateľný na pracovníkoch nočným zmien, ktorých spánkový režim odpovedá pracovným zmenám, ktoré však nie sú v súlade s ich cirkadiánnymi rytmi. Tento nesúlad má v dlhodobom merítku vážne zdravotné dôsledky. Patria medzi ne gastrointestinálne a kardiovaskulárne problémy, metabolický syndróm, poruchy nálad a spánku, či dokonca rakovina. V niektorých prípadoch, môže dôjsť k poruche, kedy je tvorba melatonínu takmer konštantná počas dňa ako aj počas noci, čo vedie k závažným zdravotným problémom. V krátkodobom merítku je táto nesynchronicita známa pod pojmom „jet lag“, teda pásmová choroba alebo desynchronóza. Nastáva ak človek za krátky čas precestuje tri alebo viac časových pásiem. Prejavuje sa únavou, bolesťami hlavy a poruchami spánku, vo vážnejších prípadoch aj krátkodobou nespavosťou či spánkovou obrnou. [11,31]

2.3 Modré svetlo a spánok

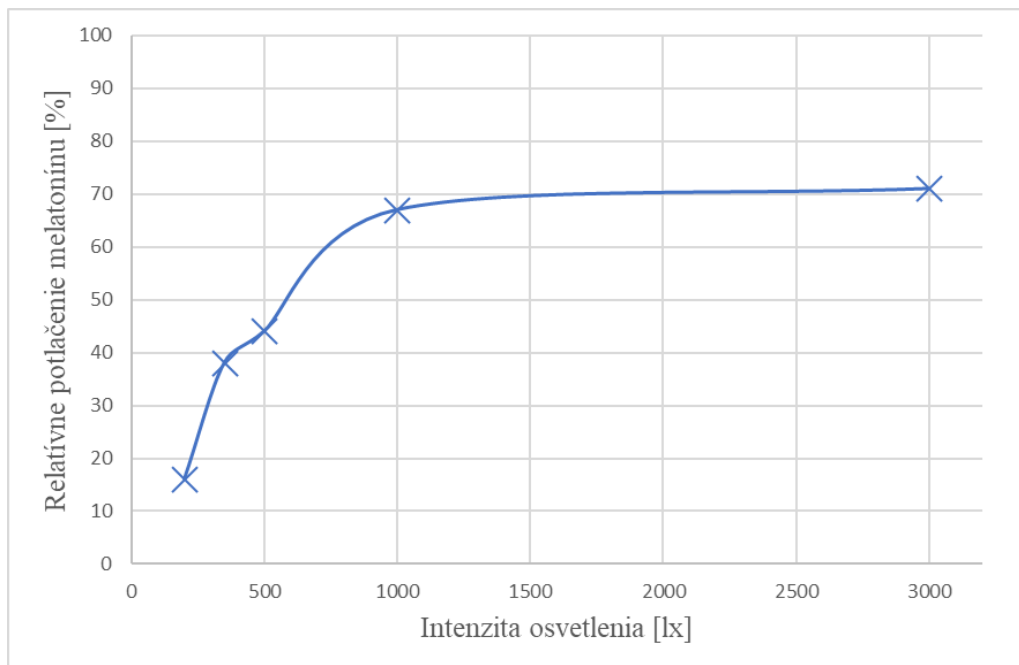
Pravdepodobne najočividnejším prejavom cirkadiálneho rytmu u človeka je spánok. Približne 36 % nášho života trávime spánkom, a keďže počas neho vedome neprijíame potravu ani neodovzdávame svoje gény, musí nám spánok dodávať niečo veľmi hodnotné. Množstvo rôznych procesov spájaných s opravou a obnovou dosahuje počas spánku vrchol. Odpadové látky a toxíny nahromadené v tele počas dňa sa odbúravajú pripravené na ich odvod z tela von, informácie zozbierané mozgom počas dňa sú ďalej spracovávané a ukladané do dlhodobej pamäte, atď. Je vedecky dokázané, že spánok resp. jeho nedostatočná kvalita a trvanie je spájaná so zhoršeným

kognitívnym výkonom, fyzickou a mentálnou vyčerpanosťou, nízkou úrovňou bdlosti, zmenami nálad a dokonca aj zdravotnými problémami ako je napr. obezita, diabetes 2. typu a u žien aj zvýšená rakovina prsníka. Veľké množstvo spánkových porúch má pôvod v narušenom cirkadiánnom rytme.[30,31]

Melatonín, často spájaný so spánkom, je syntetizovaný v epifýze, ktorá je úzko regulovaná suprachiazmatickými jadrami aby produkovala cirkadiánnny vzor vylučovania melatonínu, s nástupom počas západu, vrcholom medzi 2. a 3. hodinou rannou a ústupom počas východu Slnka. Regulácia sekrécie hormónov v epifýze skrz suprachiazmatické jadrá nám teda naznačuje prepojenie medzi svetelnými podmienkami pôsobiacimi na zrakový systém a jeho sekréciou. Melatonín je bežne avšak chybne nazývaný hormónom spánku. Výskyt zvýšenej hladiny melatonínu v krvi počas nočného spánku je skôr korelačný než kauzálny. Dokazujú to ľudia, ktorý prirodzene neprodukujú melatonín (v dôsledku choroby alebo úrazu mozgu), avšak stále preukazujú cirkadiánnny cyklus spánku a bdenia len s malými zmenami. Dokázalo sa to aj pomocou testu, kedy boli subjekty vystavené svetlu dostatočnému pre potlačenie úrovne melatonínu počas noci, pričom úrovne subjektívnej pohotovosti a bdlosti sa zvyšovali ešte pred značným poklesom melatonínu v krvi. Navyše, úroveň bdlosti a pohotovosti je možné zvýšiť pomocou svetla aj počas dňa, kedy je úroveň melatonínu takmer nedetekovateľná. [30,31]

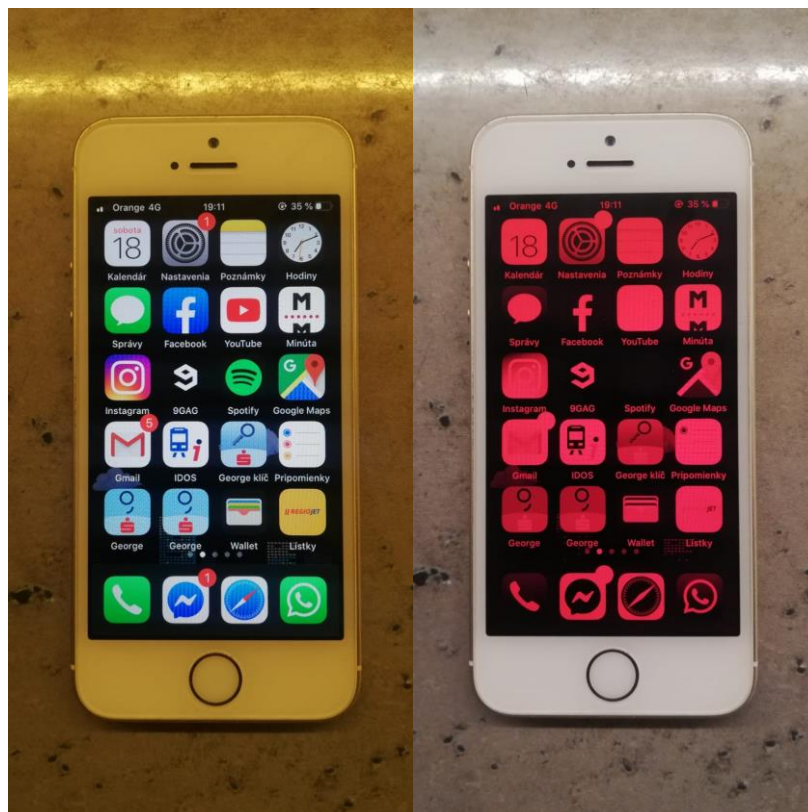
Modré svetlo má na spánok významný vplyv. V prvom rade jeho prítomnosť v adekvátnej miere v zmysle trvania, množstva a spektrálneho zloženia najmä počas prvej polovice dňa zvyšuje subjektívne vnímanie kvality a dĺžky spánku nasledujúcu noc. Naopak jeho absencia v noci je kľúčová z hľadiska vyššie spomínaného vylučovania melatonínu. A práve prechody medzi dňom a nocou, úsvit a súmrak, tvoria dôležitý *zeitgeber* resp. časovú stopu. Problém nastáva pri súmraku, kedy je zrakový systém rušený stálym prijímaním modrého svetla, či už z obrazoviek elektronických zariadení alebo iného umelého osvetlenia. Toto neprimerané vystavovanie sa modrému svetlu má za následok zhoršený spánok, čo sa prejavuje ako obmedzená REM (Rapid Eyes Movement) fáza spánku a to z hľadiska jej trvania ale aj hĺbky. Z týchto dôvodov je dôležité nevystavovať sa modrému svetlu aspoň jeden a pol hodiny pred zvyčajným časom zaspať. Tejto problematike sa venovali viaceré výskumy. Napr. v roku 1989 pod vedením McIntyrea a spol. kde bol preukázaný nasledovný princíp: svetlo vyvoláva

potlačenie melatonínu, pričom toto potlačenie nie je lineárneho typu a závisí od intenzity osvetlenia. Počas jednej hodiny v noci boli subjekty vystavené úrovniám osvetlenia o hodnotách 200, 350, 500, 1000 a 3000 lx, pričom relatívna úroveň potlačenia melatonínu bola 16, 38, 44, 67 a 71 %. [11,30]



Obr. 11: Grafické znázornenie nelineárnej závislosti potlačenia melatonínu na intenzite osvetlenia.

Pre dnešné smartfóny a iné smart zariadenia existujú či už režimy alebo stiahnuteľné aplikácie schopné blokovat' modrú zložku svetla. Jednou z takýchto aplikácií je napr. f.lux. Na zariadeniach značky Apple existuje mierne komplikovanejší spôsob, vďaka ktorému sa dá prejsť do režimu blokácie modrej zložky svetla pomocou jednoduchého trojstlačenia home button-u. Ako nevýhodu možno vnímať chýbajúcu možnosť nastavenia času, kedy by smartfón sám prešiel do tohto režimu. Spomínanú funkciu zahŕňa režim Night shift, avšak blokácia modrej zložky svetla v tomto režime je nedostatočná.



Obr. 12: Filtrácia modrej zložky svetla na mobilnom zariadení značky Apple.

Ďalším v poslednej dobe čoraz viac využívaným spôsobom blokácie modrého svetla sú okuliare blokujúce práve túto zložku svetla. V praxi sa nasadzujú približne dve hodiny pred zvyčajným časom zaspávania, a tak nám umožňujú dokončiť prácu či už na počítači alebo akékoľvek iné úkony, pri ktorých je prítomná modrá zložka svetla. V súčasnosti sa dajú zakúpiť už aj v internetových obchodoch, pričom ich ceny sa pohybujú cca od 200 CZK do 1200 CZK, v závislosti od dizajnu, kvality prevedenia a miere schopnosti blokovat' modré svetlo.

Na obrázku 12 sú okuliare značky INFIELD zakúpené na internetovom obchode v hodnote 499 CZK. Rám je z čierneho plastového materiálu s nastaviteľnou dĺžkou stráníc, ktorých konce sú pogumované pre väčší komfort pri nosení. Sklá sú z polykarbonátu a oproti bežným okuliarom sú po stranách značne predĺžené a zakrivené pre maximálnu blokáciu postranného svetla. Okuliare boli zakúpené autorom pre osobné potreby a otestovanie efektu na spánkový režim. Po približne štyroch po sebe nasledujúcich večeroch používania okuliarov v čase od 21:00 do 22:30 bolo spozorované ustálenie spánkového režimu, spolu s pravidelným časom vstávania medzi 6:15 a 6:45 bez potreby používania budíku, či už zvukového alebo svetelného. Taktiež

boli spozorované menšie výkyvy energie počas dňa a zvýšená chuť na jedlo najmä v ranných hodinách, čo v dobe pred aplikáciou okuliarov nebolo bežné. Taktiež bola spozorovaná zvýšená energia počas dňa a silný útlm okolo 22:00 hodiny aj bez použitia okuliarov. Bol spozorovaný aj zvýšený výkon pri silových aktivitách, čo však nie je možné pripísať čisto používaniu okuliarov.



Obr. 13: Okuliare blokujúce 100% modrej zložky svetla (informácia predajcu).

Na trhu dnes už existujú aj okuliare, ktoré naopak injektujú modrú zložku svetla do zrakového systému človeka a to práve kvôli jeho pozitívnym účinkom na bdelosť a sústredenosť počas dňa. Pre požadovaný efekt týchto okuliarov je ich nosenie najideálnejšie v ranných resp. doobedných hodinách. Dôvodom je dať nášmu telu dostatočný *zeitgeber*, potrebný pre reset nášho cirkadiálneho systému. Človek sa navyše rýchlejšie prebudí a melatonín v krvi sa rýchlejšie nahradí kortizolom a adrenalínom. Navyše toto ranné vystavenie má pozitívny dopad na kvalitu spánku v nadchádzajúcu noc a na celkovú úroveň energie počas celého dňa. Treba však podotknúť, že sa stále jedná o riešenie pre ľudí, ktorý nemajú ráno z rôznych dôvodov prístup k slnečnému žiareniu. Spektrálne zloženie slnečného svetla a svetla z okuliarov sa však pri terajšom stave technológií nedá porovnávať.



Obr. 14: Okuliare značky AYO emitujúce svetlo. [25]

Vhodnou kombináciou okuliarov oboch typov (svetlo blokujúce aj svetlo emitujúce), je možné zvýšiť našu energiu počas dňa, zlepšiť spánok a rýchlejšie sa vyrovnávať s jet-lagom.

2.4 Modré svetlo a psychika

Modré svetlo vplýva na funkciu neurotransmiterov, napríklad serotonínu, ktorého vylučovanie sa mení na dennej ale aj ročnej báze. Najmenšie hodnoty vykazuje v zimnom období, čo je jedna z možných príčin vzniku sezónnych depresívnych symptómov nazývaných ako sezónna afektívna porucha - SAD (Seasonal Affective Disorder). Týmito symptómami sú pocity beznádeje a bezmocnosti, strata záujmu o akékoľvek aktivity vrátane sociálnych interakcií, predĺženej doby spánku a ťažkosti pri vstávaní, prejedanie vedúce k naberaniu váhy, podráždenosť a celková znížená úroveň energie. V ojedinelých prípadoch dochádza aj ku samovraždám. Zaujímavé sú čísla, ktoré reprezentujú počet ľudí postihnutých SAD v Spojených štátoch amerických. Zatiaľ čo na Floride, (najjužnejší štát USA) je touto poruchou postihnutých len 1,4 % populácie, na Aljaške (najsevernejší štát) je to až takmer 10 %. Podobne je tomu aj vo Fínsku, kde v jeho arktickej oblasti (severne od 64. rovnobežky) trpí touto poruchou 9,6 % populácie. Samozrejme existujú určité individuálne psychologické predispozície pre vznik tejto poruchy u jedinca, avšak vplyv svetla resp. jeho nedostatok je v tomto prípade nezanedbateľný, ak nie priam kľúčový. [11,4]

2.5 Svetelná terapia a simulácia úsvitu

SAD sa dnes lieči pomocou dvoch metód. Jedná sa liečbu svetelnou terapiou a liečbu simuláciou úsvitu. Liečba tejto poruchy pomocou svetelnej terapie vychádza z predpokladu, že vystavenie postihnutého jedinca resp. jeho zrakového systému svetlu, vedie k potlačeniu sekrécie melatonínu počas dňa a zároveň ku zvýšeniu produkcie serotonínu. Využíva sa biele svetlo o hodnote osvetlenia 10 000 lx vo vertikálnej rovine vo výške očí a teplote chromatickosti 4000 K. Je potreba použiť filtre UV žiarenia, nakoľko môže dôjsť k poškodeniu oka krátkovlnným žiarením. Treba však poznamenať, že stále prebieha výskum o vhodnosti použitia bieleho alebo modrého svetla pri tomto type liečby.



Obr. 15: Liečba SAD pomocou svetelnej terapie. [7]

Pacient sedí v predpísanej vzdialenosti 30 - 60 cm od svetelného boxu s otvorenými očami, nie však upretými priamo do svetelného zdroja po dobu 30 – 60 minút. Častým problémom u pacientov je však paradoxne samotný spôsob vykonávania tejto liečby. Podľa jednej štúdie až 69 % pacientov pokladá tento spôsob liečby za nepríjemný a až 19 % pacientov kvôli tomuto liečbu ukončí. Ako vhodná alternatíva sa javí liečba simulovaným úsvitom. [7]

Liečba simulovaným úsvitom spočíva v použití svetelných zdrojov schopných simulovať východ slnka, pričom čas a postupné zvyšovanie osvetlenia je nastaviteľné podľa individuálnej potreby, zvyčajne v rozmedzí 30 minút až 2 hodín. Pri vhodnom použití je pacient schopný sa prirodzene a bez problémov zobudiť do simulovaného úsvitu, kedy sa táto liečba považuje za úspešnú. Táto liečba pracuje na základe faktu, že ľudský organizmus je citlivejší na svetelné signály v ranných časoch než napríklad na poludnie (viď. Obr. 6 – PRC). Rozdielom oproti svetelnej terapii je fakt, že sa pracuje s oveľa nižšími hodnotami osvetlenia v rozsahu 100 až 300 lx, čo je oproti 10 000 lx nezanedbateľne nižšia a pre pacientov oveľa príjemnejšia hodnota. Rôzne štúdie ukazujú rôzne efektivity týchto liečebných postupov, takže vo výsledku záleží na samotnom pacientovi, ktorú z týchto liečebných procedúr podstúpi. V niektorých prípadoch pacienti podstupujú obe liečby zároveň aby bola dosiahnutá maximálna účinnosť hneď na začiatku dňa. [8]



Obr. 16: Simulátor úsvitu. [23]

3. Systémy pro-kognitívneho osvetlenia

V tejto časti bude prebraná technológia osvetľovacích systémov zameraných na kognitívne funkcie. Táto kapitola bude pozostávať z troch častí. V prvej časti bude prebrané pre človeka najprirodzenejšie osvetlenie, ktorým je osvetlenie slnečné. Takéto osvetlenie môžeme považovať za osvetlenie referenčné z dôvodov, ktoré budú neskôr spomenuté. V druhej časti budú prezentované podmienky a spôsoby návrhu osvetľovacej sústavy, aby mohla byť táto sústava nazývaná pro-kognitívnou tj. aby rešpektovala individuálne prirodzené potreby človeka, pričom tieto potreby sa menia v závislosti na činnostiach vykonávaných v priestoroch s týmto osvetlením a na čase kedy sú tieto činnosti vykonávané. S ohľadom na zameranie tejto práce sú to činnosti zvyčajne vyžadujúce vysokú mieru sústredenia a psychickej námahy. V tretej a poslednej časti, budú odprezentované osvetľovacie systémy, ktoré spĺňajú podmienky určené v predchádzajúcej, druhej časti.

Osvetľovacie systémy zamerané na zlepšenie kognitívnych funkcií, sú vo svojej podstate cirkadiánnymi osvetľovacími systémami. V predchádzajúcej kapitole o cirkadiánnom rytme bolo pomocou viacerých vykonaných experimentov preukázaná spojitosť medzi kognitívnym výkonom a cirkadiánnym rytmom človeka. Synchronizácia cirkadiánného rytmu s rytmom striedania dňa a noci má pozitívny vplyv na mnohé aspekty nášho života. Pre účely tejto práce je najdôležitejšie, že medzi tieto aspekty patrí aj zvýšenie kognitívneho výkonu. Preto je na mieste tvrdenie, že osvetlenie, ktoré rešpektuje cirkadiánnny rytmus človeka je zároveň osvetlením, ktoré podporuje jeho kognitívne funkcie. O pro-kognitívnom resp. cirkadiánnom osvetľovaní bude pojednané v kapitole o požiadavkách na osvetľovaciu pro-kognitívnu sústavu.

3.1 Denné osvetlenie

Je všeobecne známym a výskumami potvrdeným faktom, že človeku je najprirodzenejšie osvetlenie slnečné. Toto tvrdenie dáva zmysel, nakoľko človek a všetok život na Zemi existuje či už priamym alebo nepriamym pôsobením Slnka. Pred vynálezom žiarovky v roku 1879 bolo slnečné žiarenie jediným dominantným zdrojom svetla a človek sa pod ním vyvíjal tisícky rokov. Preto by mala byť vyvinutá snaha o čo

najväčšiu možnú integráciu slnečného svetla do architektúry budov. Z toho vyplýva, že pre optimálne osvetlenie budov, je potrebná konzultácia so svetelným architektom už pri samotnom architektonickom návrhu budov. Od orientácie samotnej novostavby s ohľadom na zemepisnú šírku, cez zakomponovanie okien a svetlovodov a iných architektonických prvkov ako funkčného prvku osvetľovacej sústavy budovy, až po použité materiály. V prípade rekonštrukcii, by mala byť vyvinutá snaha o zakomponovanie týchto prvkov do návrhu tak, aby došlo k maximálnemu využitiu orientácie budovy vzhľadom ku pohybu Slnka po oblohe, pričom musí byť na zreteľ braná už existujúca orientácia objektov a budov, ktoré ho obkolesujú resp. svojou existenciou môžu ovplyvňovať svetelné parametre slnečného žiarenia.

Avšak slnečné svetlo netreba príliš idealizovať. Osvetľovanie pomocou slnečného žiarenia so sebou prináša viaceré problémy. Na rozdiel od umelého osvetlenia je Slnko prírodnou silou, ktorú nemožno ovládať. Svetelný tok, jeho intenzita, smerovanie a aj spektrálne zloženie závisí na meteorologických podmienkach, zemepisnej šírke a okolitom prostredí, či už prírodnom alebo mestskom. Vo všeobecnosti je slnečné osvetlenie považované za príliš intenzívne a teda rušivé pri vykonávaní akejkoľvek činnosti. Pre porovnanie, intenzita osvetlenia Slnkom sa pohybuje v rozmedzí 1000 lx v zime pri zatiahnutej oblohe, až po 150 000 lx v lete pri bezoblačnej oblohe. Navyše je nositeľom UV zložky, ktorá v neprimeraných množstvách môže byť zdraviu škodlivá a IR zložky, ktorá prenáša teplo, čo môže mať v letných mesiacoch negatívny dopad na prehrievanie budov. V prípade klimatizovaných objektov to predstavuje zvýšené nároky kladené na klimatizáciu. Pri porovnaní s minimálnymi hodnotami osvetlenia uvedenými v norme ČSN EN 36 0452, ktoré sa pohybujú v rozmedzí 50 lx pre komunikačné priestory až po 750 lx pre priestory v ktorých je vykonávaná jemná ručná práca, sú hodnoty intenzity denného osvetlenia rádovo vyššie. Toto všetko sú premenné, ktoré je potrebné vziať do úvahy pri návrhu denného osvetľovania. [30]

Jedným z možných spôsobov ako dosiahnuť lepšie osvetlenie vnútorných priestorov budov prirodzeným slnečným svetlom je použitie heliostatu v kombinácii s vhodnou sústavou zrkadiel. Táto sústava by mala byť skonštruovaná tak, aby bola schopná usmerniť tok slnečného svetla do vnútorných priestorov budov v rozumnej miere odpovedajúcej vykonávanej práci ako aj individuálnym potrebám ľudí pracujúcich alebo obývajúcich danú budovu. Malo by byť brané na zreteľ, aby takáto

sústava nespôsobovala oslnenie alebo neprimerané prehrievanie budovy, nakoľko, ako bolo spomenuté vyššie, okrem svetla takáto sústava prenáša aj tepelnú energiu v podobe infračerveného žiarenia. Toto je problémom najmä v letných mesiacoch; v zimných to naopak môže byť žiaducim efektom. Spoločne sa všetky spôsoby osvetľovania vnútorných priestorov nazývajú denným osvetľovaním z ang. „daylighting“. Benefity využívania denného svetla, okrem už vyššie spomínanej subjektívnej preferencie, zahŕňajú aj úsporu energie. [9]

Dnes už pomerne známe svetlovody sú ďalším zo spôsobov ako dostať viac prirodzeného svetla ku človeku vo vnútri budov. Svetlovod funguje na veľmi jednoduchom princípe. Jedná sa o sústavu troch častí:

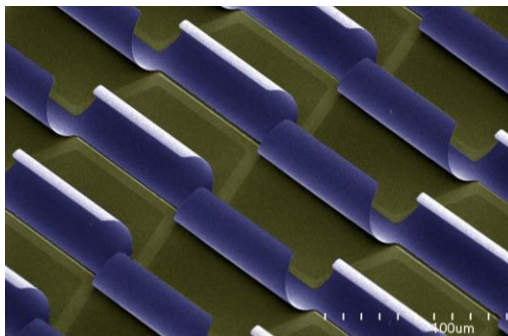
1. záchytná guľa – zachytáva maximum svetla a láme ho do tubusu,
2. tubus – je tvorený vysokoreflexným materiálom (98% odraznosť pre striebro), vďaka ktorému je svetlo prenášané na difúzor s minimálnymi stratami,
3. difúzne sklo – jeho úlohou je rozptýlenie svetelného toku do priestoru požadovaným spôsobom, tj. bez možnosti oslnenia alebo príliš veľkej koncentrácie svetelného toku na malú plochu.



Obr. 17: Svetlovod. [26]

Použitie svetlovodu sa javí ako technicky najmenej náročný spôsob ako priviesť do interiéru budov slnečné svetlo bez spotreby akejkoľvek energie. Regulácia množstva osvetlenia je potom vykonávaná pomocou jednoduchej klapky. Oproti svetlíkom a oknám má výhodu v lepšej tepelnej izolácii, spolu s možnosťou privedenia svetla to útrob budov, ktoré nemajú prístup k oknám a teda ani k slnečnému svetlu. Paradoxne jeho najväčšia výhoda je aj jeho nevýhodou, ako je to u väčšiny technológií spoliehajúcich sa na prírodné sily. Pri zatiahnutej oblohe neexistuje svetlo, ktoré by svetlovod mohol priviesť do interiéru, čo sa ale v dnešnej dobe dá riešiť pomocou zakomponovania svetelného zdroja priamo do konštrukcie svetlovodu. [26]

Vlna smart technológií neobišla ani samotné okná. V dnešnej dobe existujú na trhu tzv. mikrožalúzie. Ide o veľmi tenkú vrstvu kovu nanesenú na povrch skla vytvarovanú pomocou laseru vid'. obr. 18. Pre oko sú tieto mikrožalúzie prakticky neviditeľné. Fungujú na princípe pôsobenia elektrického poľa medzi samotnými mikrožalúziami a tenkou priehľadnou vodivou vrstvou oxidu, pričom tieto dve vrstvy sú oddelené tenkým izolantom. Ak medzi mikrožalúziami a vodivou vrstvou nie je rozdiel potenciálov, mikrožalúzie sú zrolované. Pri aplikovaní napätia sa žalúzie roztiahnu a teda zablokuje prechodu svetla. Medzi ich výhody patrí rýchlosť (milisekundy), reflektívnosť (odrážajú aj UV žiarenie) a možnosť úpravy tieniacej plochy podľa potreby. [32]



Obr. 18: Mikrožalúzie pod elektrónovým mikroskopom. [32]

3.2 Požiadavky na pro-kognitívnu osvetľovaciu sústavu

Termín „pro-kognitívna“ osvetľovacia sústava nie je oficiálne uznaným pojmom označujúcim sústavu, ktorá podporuje kognitívne funkcie. Tento pojem bol autorom prebraný zo Záverečnej výskumnej správy vyhodnotenia vplyvu pro-kognitívneho

osvetlenia v budove Gymnázia Na Pražačke pod vedením Ing. arch. Lenky Maierovej, Ph.D. a Bc. Igora Kytka z UCEEB ČVUT (Univerzitné centrum energeticky efektívnych budov, České vysoké učení technické v Praze). Tento termín bol vybraný z jednoduchého dôvodu, že už po prvom prečítaní čitateľ jasne pochopí zmysel a zameranie takéhoto osvetlenia a preto bude ďalej v tejto práci používaný. Je potrebné však podotknúť, že tento typ osvetlenia má rôzne názvy, či už human centric lighting, biodynamické osvetľovanie alebo cirkadiánne osvetľovanie. Všetky tieto názvy pomenovávajú osvetľovací systém, ktorý berie v úvahu obrazotvorný aj neobrazotvorný vplyv svetla na človeka. Medzinárodná komisia pre osvetľovanie CIE si je vedomá týchto viacerých názvov a preto z dôvodu jasnej a efektívnej komunikácie zaviedla v druhej edícii svojho medzinárodného osvetľovacieho slovníku pojem *integratívne osvetľovanie* ako oficiálny názov pre tento typ osvetlenia. Uviedla tak vo svojom oficiálnom stanovisku k nevizuálnym efektom svetla. Dôvodom výberu slova *integratívne*, ako uvádza vo svojom stanovisku, je že takýto typ osvetlenia v sebe integruje vizuálne aj nevizuálne efekty svetla, zodpovedné za fyziologické a psychologické pôsobenie na ľudí s podkladmi opierajúcimi sa o vedecké dôkazy.

Ľudia dnes trávajú 90 % svojho času v interiéri a preto je dôležité venovať náležitú pozornosť osvetľovaniu, ktoré je jedným zo základných pilierov zdravotne nezávadného prostredia človeka. Tento fakt nabera na význame najmä u priestorov, v ktorých je vyžadovaná vysoká miera sústredenia a psychickej námahy; školy a laboratória sú ideálnym príkladom takýchto priestorov. Pre maximálnu efektivitu študijných a výskumných procesov v týchto priestoroch je potrebné vytvoriť také podmienky, ktoré budú dostatočne stimulovať ako študentov tak aj vyučujúcich resp. pracovníkov v laboratóriu. A jedným z parametrov, ktoré významne vplyvajú na tvorbu týchto podmienok je práve použité osvetlenie. U študentov, ktorí sa nachádzajú vo fáze dospievania a rannej fázy dospelosti je vytvorenie vhodných svetelných podmienok o to dôležitejšie, práve kvôli hormonálnym zmenám v ich organizme, ktoré ich robia skupinou najcitlivejšou na dodržiavanie zákonitostí vyplývajúcich z ich cirkadiánnych rytmov tj. pobyt na jasnom svetle s výrazným zastúpením modrej zložky počas dňa a redukcia intenzity a modrej zložky svetla počas noci. Paradoxne práve táto skupina ľudí najčastejšie vykazuje chovanie v úplnom protiklade s týmito zákonitosťami. Celodenný sedavý pobyt vo vnútorných priestoroch s nekvalitným osvetlením resp.

s nedostatkom prirodzeného slnečného osvetlenia a prílišné vystavovanie sa modrému svetlu z obrazoviek počas noci.

Podľa normy ČSN EN 17 037 by mali byť všetky vzdelávacie priestory osvetľované primárne denným svetlom. Umelé osvetlenie by malo byť použité len v čase jeho nedostatku. Na druhej strane tu je zase už vyššie spomínaný fakt, že denné osvetlenie je často príliš intenzívne. Tento fakt je umocňovaný použitými elektronickými učebnými pomôckami ako sú napr. počítače, projektory alebo interaktívne tabule, ktoré vyžadujú dostatočný kontrast oproti okolitému prostrediu pre zaistenie čitateľnosti. To vedie ku dlhodobému zatemňovaniu okien a obmedzovaniu intenzity umelého osvetlenia, čo je však v priamom rozpore s požiadavkami na zdravé osvetľovanie. To vedie spoločne s narušením nášho cirkadiálneho rytmu aj ku zníženiu kognitívneho výkonu. Je teda potrebné využívať osvetlenie, ktoré zaistí dostatočnú stimuláciu cirkadiálneho rytmu a tým navýši kognitívny výkon študentov aj vyučujúcich. [33]

Ako už bolo spomenuté, ľudia uprednostňujú prirodzené svetlo pred umelým. Všeobecná spokojnosť ľudí je ku príkladu silne ovplyvňovaná prítomnosťou okna na pracovisku s výhľadom na vonkajšie prostredie. Vedecké štúdie dokonca preukazujú lepšie študijné výsledky u študentov, ktorí sedia pri okne. Avšak jemné odchýlky preferencií osvetľovania sa môžu od jedinca k jedincovi líšiť.

Tieto preferencie závisia od nasledujúcich parametrov:

- odlišnosti vo fyziológii oka (pigmentácia dúhovky, veľkosť dilatácie zornice, kvalita celého zrakového aparátu, atď.),
- rozdiely spôsobené načasovaním osvetlenia v súvislosti s odlišnými cirkadiálnymi rytmiami jedincov (extrémne prípady chronotypov – ranný „škovránok“, večerná „sova“),
- genetika v zmysle rozdielnej citlivosti a reakcie na svetlo,
- strava resp. jej množstvo, typ a načasovanie a aj metabolizmus tiež prispievajú k odlišnostiam vo vnímaní svetla,
- predchádzajúce stavy vystavenia svetlu a doba bdlosti predchádzajúca súčasnému osvetleniu,
- kultúrne rozdiely,

- zdravotný stav tiež ovplyvňuje ako je svetlo vnímané a aké je preferované napr. pacienti s migrénou bývajú precitlivejší na svetlo, niektoré choroby ako napríklad cukrovka alebo iné vrodené ochorenia zrakového nervu sa prejavujú zvýšenými požiadavkami na osvetľovanie, atď. [4]

Svetová zdravotnícka organizácia definuje zdravie ako „stav kompletnej fyzickej, mentálnej a sociálnej pohody a nielen ako stav neprítomnosti choroby alebo slabosti“. Aj táto definícia sa podieľala na piatich princípoch zdravého osvetľovania podľa CIE (Commission Internationale l'Eclairage – Medzinárodná komisia pre osvetľovanie).

Sú to tieto princípy:

1. Denná dávka u ľudí zo západných industrializovaných krajín môže byť príliš malá.
2. Zdravé svetlo je neodlučiteľne späté so zdravou tmou.
3. Svetlo potrebné pre biologické pochody by malo byť bohaté v tých oblastiach spektra, na ktoré je nevizuálny systém najviac senzitívny.
4. Pri určovaní dávky svetla prijímanej okom človeka je dôležité brať v úvahu ako svetlo prijímané priamo od svetelného zdroja ale aj svetlo odrazené od okolitého prostredia.
5. Načasovanie osvetlenia ovplyvňuje efekt dávky svetla. [4]

Tieto princípy nie len že prospievajú zdraviu ale navyše dokážu zlepšiť kognitívne funkcie počas dňa. Takýto osvetľovací systém pritom nepozostáva len zo svetelných zdrojov, ale jedná sa o komplexný systém senzorov, regulovateľných svetelných zdrojov a riadiacej programovateľnej logiky, ktorá berie v úvahu prítomnosť ľudí v objekte, vykonávané činnosti a časový dň. Predchádzajúce princípy teda môžeme viac špecifikovať pre potreby návrhu osvetľovacej sústavy.

Kľúčové charakteristiky pro-kognitívneho osvetľovacieho systému:

- umelé osvetlenie v interiéroch by malo byť regulovateľné v zmysle množstva svetelného toku a náhradnej teploty chromatickosti,
- regulácia spomínaných dvoch parametrov by mala byť v súlade so zmenami aké nastávajú u prirodzeného denného svetla,

- svetlo musí obsahovať významný podiel modrej zložky svetla a to hlavne v prvej polovici dňa, tj. malo by byť použité studené biele svetlo,
- takéto svetlo by malo byť aj o odpovedajúcej intenzite, aby bola zaistená dostatočná stimulácia cirkadiálneho rytmu,
- počas obdobia odpočinku a v neskorších poobedných hodinách by sa mal znižovať podiel modrej zložky svetla na úkor červenej zložky, tj. malo by byť použité teplé biele svetlo o nižšej intenzite,
- cirkadiánna stimulácia by mala byť vo veľkej miere vykonávaná najmä v prvej polovici dňa pričom s príchodom večerných hodín by mala takmer vymiznúť,
- takéto osvetlenie by malo okrem cirkadiánnej stimulácie naďalej poskytovať dostatočný index podania farieb, pre zachovanie svojho, dnes už nie jediného, účelu poskytovania vizuálnych informácií o našom okolí. [30]

Z predchádzajúcej definície požiadaviek je jasné, že pre zaistenie regulácie potrebných parametrov je potrebná smart svetelná technológia tj. technológia, ktorá umožňuje reguláciu teploty chromatickosti, intenzitu osvetlenia a smerovania svetelného toku v závislosti na čase, type miestnosti resp. práce v nej vykonávanej a prednastavených individuálnych preferencií. Táto regulácia by pritom mala prebiehať autonómne bez potreby akýchkoľvek komplikovanejších zásahov od užívateľov. Vďaka použitiu takýchto osvetľovacích systémov je možné nie len poskytnúť zdraviu prospešné svetelné prostredie, ale aj úsporu elektrickej energie. Potrebnou súčasťou takéhoto systému je okrem samotných svetelných zdrojov aj rada senzorov. Tie sú neoddeliteľnou súčasťou, nakoľko poskytujú spätnú väzbu potrebnú pre regulácie svetelných parametrov. Okrem merania týchto parametrov by mali byť tieto senzory schopné aj určiť prítomnosť osôb v danom priestore, pre obmedzenie plytvania elektrickou energiou. Vyspelejšie senzory by mali byť schopné určiť aj presnú pozíciu, typ vykonávanej práce a individuálne potreby osoby prítomnej v osvetľovanej miestnosti. Okrem toho by mal tento systém umožňovať aj určitú mieru prispôsobenia svetelných parametrov ako napr. možnosť zmeny teploty chromatickosti alebo usmernenie svetelného toku pre priame a nepriame osvetľovanie, pre zaistenie dostatočnej zrakovej pohody. A nakoniec všetky jednotlivé prvky tohto osvetľovacieho

systemu by mali byť navzájom prepojené a/alebo byť súčasťou smart elektroinštalácie skrz IoT (Internet of Things).

Po vymenovaní všetkých vyššie uvedených požiadaviek, by mala osoba zodpovedná za návrh takejto osvetľovacej sústavy mať na pamäti, že v centre tohto systému je človek a jeho vzťah ku okolitému prostrediu. Tento vzťah môžeme do veľkej miery pozitívne formovať práve pomocou vhodnej osvetľovacej sústavy. Pri návrhu takejto sústavy je potrebné mať na pamäti nasledujúce fakty:

- svetelný cyklus, ktorému sú ľudia vystavený počas dňa môže mať nerušiť ich cirkadiánnny rytmus a negatívne ovplyvniť dĺžku a kvalitu spánku počas noci, čo má negatívne následky na zdraví, produktivite a kognitívnom výkone počas nasledujúcich dní,
- vek je dôležitým parametrom pri návrhu osvetľovacej sústavy; pre starších a zrakovo postihnutých sú požiadavky vyššie než pre ľudí so zdravým zrakom,
- spektrálne zloženie svetla vplýva na schopnosť sústredenia kognitívneho výkonu počas dňa ako aj počas noci napr. u pracovníkov nočných zmien,
- vystavovanie sa svetlu v čase noci redukuje produkciu melatonínu, čo má v návaznosti na spánok negatívne dlhodobé následky na zdraví,
- kvantifikovanie cirkadiánnnych účinkov svetla musí byť vykonané na úrovni, ktorá odpovedá úrovni očí pozorovateľa, nie na úrovni pracovnej plochy,
- musí byť zohľadnený vplyv prostredia na náhradnú teplotu chromatickosti, ktorá je týmto vplyvom vo všeobecnosti menšia než hodnota inštalovaných svetelných zdrojov,
- osvetľovacia sústava by mala vždy poskytovať určitú mieru úpravy parametrov, nakoľko každý človek vykazuje mierne odlišné preferencie spomínané vyššie. [30]

Aby bolo možné porovnávať a predpovedať vplyv svetla na človeka, CIE navrhla štandardizovanú metódu merania svetla a svetla vyžarujúcich zariadení pre zistenie do akej miery sú aktivované svetlocitlivé procesy v oku. Zároveň je zriaďovaný spoločný technický výbor, ktorý má za úlohu vytvoriť prvý štandard na kvantifikáciu ožiarenia so zahrnutím vplyvu na všetky očné fotoreceptory.

Štúdie z posledných rokov boli vykonané na malej skupine jedincov v laboratórnych podmienkach počas krátkej doby trvania. Tieto zistenia nie sú postačujúce na získanie relevantných poznatkov pre návrh zdravie podporujúcej stratégie osvetľovania. Je potrebných viac presných, detailných štúdií na väčšej a rozmanitejšej vzorke respondentov, naprieč rokmi, ročnými obdobiami aj rovnobežkami. Ďalej treba poznamenať, že do dnešného dňa nie je určený dostatočne presný ukazovateľ, ktorý spoľahlivo predpovedá rozdielny vplyv svetla na jedinca v priebehu dňa, nakoľko potlačenie tvorby melatonínu je možné sledovať len počas noci. Tieto všetky aspekty sťažujú vytvoriť presné odporúčania pre intenzitu, spektrum, distribúciu a dynamiku týchto parametrov, ktoré by boli používané projektantami. [4]

3.2.1 Výskum vplyvu pro-kognitívneho osvetlenia na študentoch Gymnázia Na Pražačke

Tento výskum vykonaný v budove Gymnázia Na Pražačke pod vedením Ing. arch. Lenky Maierovej, Ph.D. a Bc. Igora Kytka z UCEEB ČVUT (Univerzitné centrum energeticky efektívnych budov, České vysoké učení technické v Praze). Pri tomto výskume bolo v 13 učebniach inštalované nové pro-kognitívne osvetlenie od spoločnosti Spectrasol. Spektrálna charakteristika tohto osvetlenia sa veľmi podobá dennému osvetleniu, pričom maximálna odchýlka v zastúpení vlnových dĺžok nepresahovala 13,5 %. V spektre je oproti bežným typom osvetlenia vo veľkej miere zastúpená modrá a azúrová farba o vlnových dĺžkach 450 až 500 nm, ktoré preukázateľne podporujú kognitívny výkon. Vplyv tohto osvetlenia bol sledovaný po celý školský rok od doby inštalácie. Boli vyhodnocované viaceré faktory ako napr. subjektívne hodnotenie v dotazníkoch, študijný prospech, absencie, atď. Pre objektívne vyhodnotenie boli výsledky študentov GNP porovnávané s iným kontrolným gymnáziom. Výsledky jednoznačne potvrdili pozitívny vplyv pro-kognitívneho osvetlenia. Jedným z presvedčivých dôkazov bol prepád vo väčšine sledovaných parametrov u študentov kontrolného gymnázia počas zimných mesiacov, kedy bol nedostatok denného osvetlenia. Tento prepád, však u študentov GNP nebol zaznamenaný. Navyše pri medziročnom zrovnaní študijných výsledkov došlo ku štatisticky významnému zlepšeniu. Toto zlepšenie sa prejavilo najmä u predmetov

vyžadujúcich logické myslenie. Tak isto došlo ku zníženiu počtu neskorých príchodov, čo je možné interpretovať ako lepšiu synchronizáciu cirkadiánneho rytmu. [33]

3.3 Osvetľovacie systémy používané v praxi

V tejto kapitole budú prezentované najrozšírenejšie osvetľovacie systémy dostupné na trhu. Záujem o tieto osvetľovacie systémy v posledných rokoch stále stúpa, čo má za následok neustále rozširovanie ponuky stávajúcich ale aj novovzniknutých značiek. Je možné si vytvoriť dostatočne vyhovujúcu osvetľovaciu sústavu za neustále sa znižujúcu cenu, ktorá sa pohybuje v rozmedzí pár EUR resp. desiatok CZK až po desiatky EUR resp. stovky CZK. V dnešnej dobe môžeme tvrdiť, že LED zdroje majú na trhu so svetelnými zdrojmi dominanciu, ktorú v nasledujúcich rokoch len potvrdzovať.

Dôvodov dominancie LED zdrojov je hneď niekoľko:

- jednoduché prispôbenie množstva svetelného toku,
- široká ponuka svetiel s rôznymi náhradnými teplotami chromatickosti,
- dostupnosť v rôznych farbách,
- možnosť jednoduchého riadenia distribúcie intenzity svetla,
- elektronické riadenie napájacieho zdroja,
- vysoká energetická účinnosť,
- dlhá životnosť,
- zvyšujúca sa dostupnosť kvôli trendu klesajúcej ceny.

Od roku 1962 kedy bola vyrobená prvá LED prešla technológia LED osvetľovania vývojom, ktorý umožnil prechod z pozície signalizačného svetla ku najrozšírenejšiemu svetelnému zdroju akým je dnes. Taktiež môžeme sledovať postupné zlučovanie svetelných zdrojov a svietidiel. Dnes bývajú LED svetelné zdroje vyrábané a predávané čoraz častejšie ako jeden celistvý prvok spolu so svietidlom a napájacím zdrojom. Nakoľko LED emitujú len farebné svetlo, pre dosiahnutie bieleho svetla sa najčastejšie používa modrá LED potiahnutá žltým luminoforom. Modré svetlo emitované LED pri dopade na vrstvu luminoforu toto svetlo konvertuje a ďalej emituje svetlo o väčších vlnových dĺžkach s vrcholom v žltej časti spektra. Toto svetlo je ľuďmi

vnímané ako biele. Špičkou v laditeľných bielych LED sú tzv. hybridné LED kde sa vyžarovanie bieleho svetla dosahuje kombináciou červenej alebo jantárovej LED a LED s bielym odtieňom s vrcholom viac posunutým do zelenej časti spektra. Táto LED s bielym odtieňom je vyrobená taktiež pomocou modrej LED s vrstvou luminoforu, avšak v tomto prípade je luminofor zelený, čo vyúsťuje do oveľa menších strát pri konvertovaní ako v prípade žltého luminoforu. Dôvodom je že rozdiel medzi modrou a zelenou farbou v spektre je menší než medzi modrou a žltou.

Ako už bolo viackrát spomenuté slnečné svetlo je pre človeka najprirodzenejšie. Avšak nakoľko sa jeho spektrálne zloženie počas dňa mení, CIE predstavila ohodnocovanie slnečného svetla pomocou tzv. D-série osvetlenia (CIE 015:2004). Táto séria ohodnocuje spektrálne zloženie slnečného svetla pomocou označení D40 až D250, čo odpovedá náhradnej teplote chromatickosti 4000 až 25000 K. V európskych zemepisných šírkach sa najčastejšie stretávame nasledovnými hodnotami:

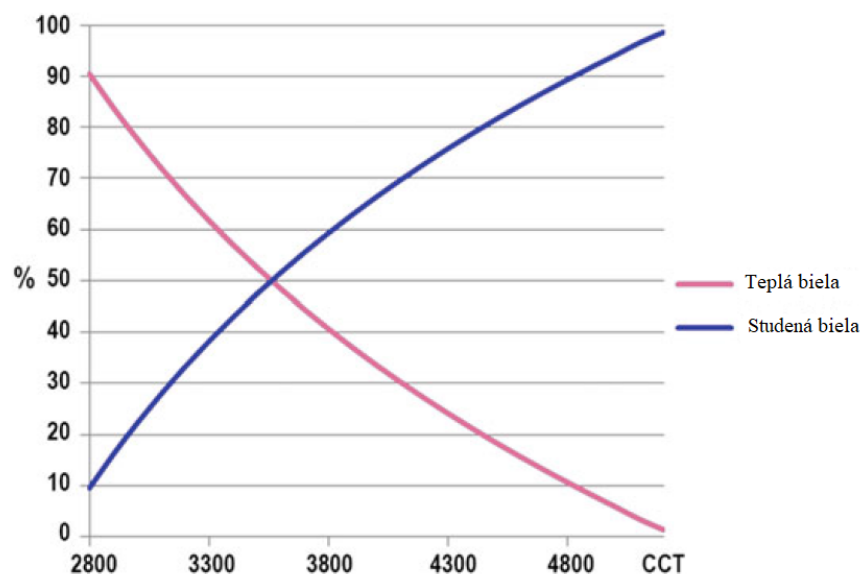
- D50 – 5000 K; neutrálne biele svetlo pri zatiahnutej oblohe,
- D65 – 6500 K; suma Slnka a oblohy počas poludnia;
- D75 – 7500 K; jasná modrá severná obloha.

Je teda potrebné, aby boli aj svetelné zdroje schopné imitovať zmeny teploty chromatickosti v podobných rozsahoch. Riešením sa stali laditeľné biele LED zdroje. Principiálne sa jedná o podobný spôsob tvorby požadovaného svetelného výstupu ako pri RGB LED zdrojoch. Pri RGB zdrojoch sa pomocou riadenia troch farebných LED namixuje požadovaný farebný svetelný výstup. Pri laditeľných bielych LED zdrojoch sa namiesto farebných LED použijú dva, v kvalitnejších výrobkoch tri biele typy LED s rozdielnymi teplotami chromatickosti, typicky v rozmedzí 3000 ± 500 K až 6000 ± 500 K. Vďaka skutočnosti, že každá z týchto sústav LED s rozdielnymi T_c na matici má vlastný elektrický obvod, je možné pomocou dvoch resp. troch radiacií kanálov namixovať požadovanú výslednú teplotu chromatickosti. [30]

3.3.1 Sharp Tiger Zenigata

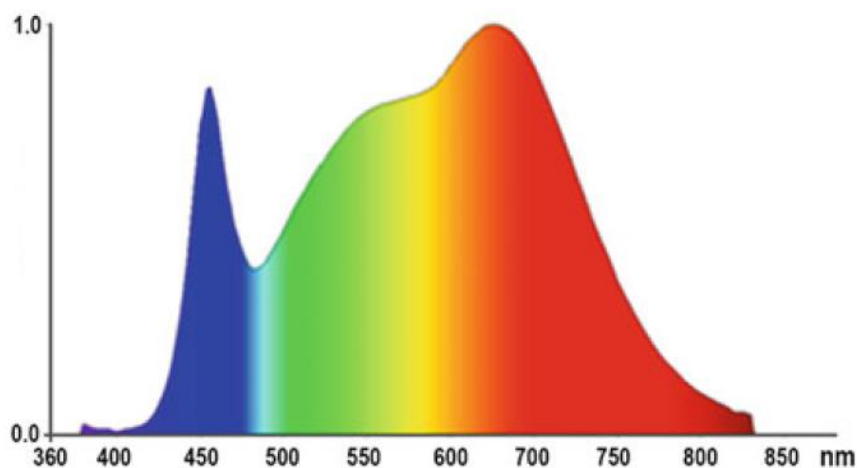
Ako príklad možno uviesť technológiu Tiger Zenigata od spoločnosti Sharp. Táto technológia pozostáva z dvoch typov rozličných luminoforov umiestnených v striedajúcich sa pásoch na matici modrých LED. Obe skupiny LED majú vlastné

elektrické okruhy a teda sa dajú nezávisle ovládať pomocou zmeny podielu napájacieho prúdu do spomínaných elektrických okruhov. Výsledná teplota chromatickosti bieleho svetla sa dá regulovať v intervale 2800 až 5500 K.



Obr. 19: Percentuálny podiel teplej a studenej bielej potrebnej pre dosiahnutie požadovanej náhradnej teploty chromatickosti. [30]

Pri testovaní tohto LED zdroja bolo zistené, že pri náhradných teplotách chromatickosti 3000 a 4000 K bol dosiahnutý index podania farieb väčší ako 96. Tak isto aj index podania dvoch, najmä pre LED zdroje, problémových farieb a to červenej (R_9) a ružovej (R_{13}) dosahoval hodnoty väčšie než 85.

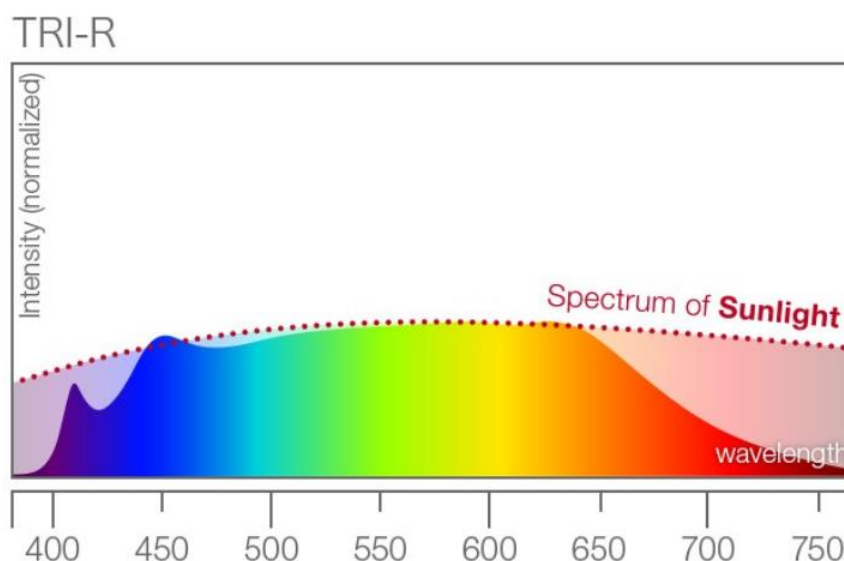


Obr. 20: Spektrálne zloženie laditeľného bieleho LED zdroja Tiger Zenigata od spoločnosti Sharp. [30]

Na obrázku 20 môžeme spozorovať tri rôzne vrcholy. Prvý v modrej časti spektra je spôsobený modrými LED pod vrstvami luminoforu. Druhé dva vrcholy v zelenej a červenej časti spektra spôsobujú spomínané dva rozdielne druhy luminoforu.

3.3.2 Toshiba TRI-R

Trochu odlišnou technológiou od predchádzajúceho prípadu oplýva LED technológia TRI-R od japonského korporátu Toshiba. Ich hlavným zámerom bolo čo najvernejšie reprodukovať slnečné svetlo bez škodlivého UV a nepotrebného IR žiarenia. Na svojich webových stránkach uvádzajú 95 % reprodukciu slnečného svetla s indexom podania farieb 97. Náhradnú teplotu chromatickosti je možné regulovať v rozsahu 2000 až 6500 K. Spomínanou odlišnosťou je spôsob vytvorenia bieleho svetla. Kým vo väčšine prípadov je použitá modrá LED s dvoma rozličnými vrstvami luminoforu, konkrétne so zelenou a červenou. TRI-R technológia využíva fialovú LED s až troma rozličnými vrstvami luminoforu, menovite s modrou, zelenou a červenou. Vďaka tomuto nie je možné pozorovať špičku v modrej časti spektra, typickú pre LED zdroje s konvertovaním z modrej LED. [34]

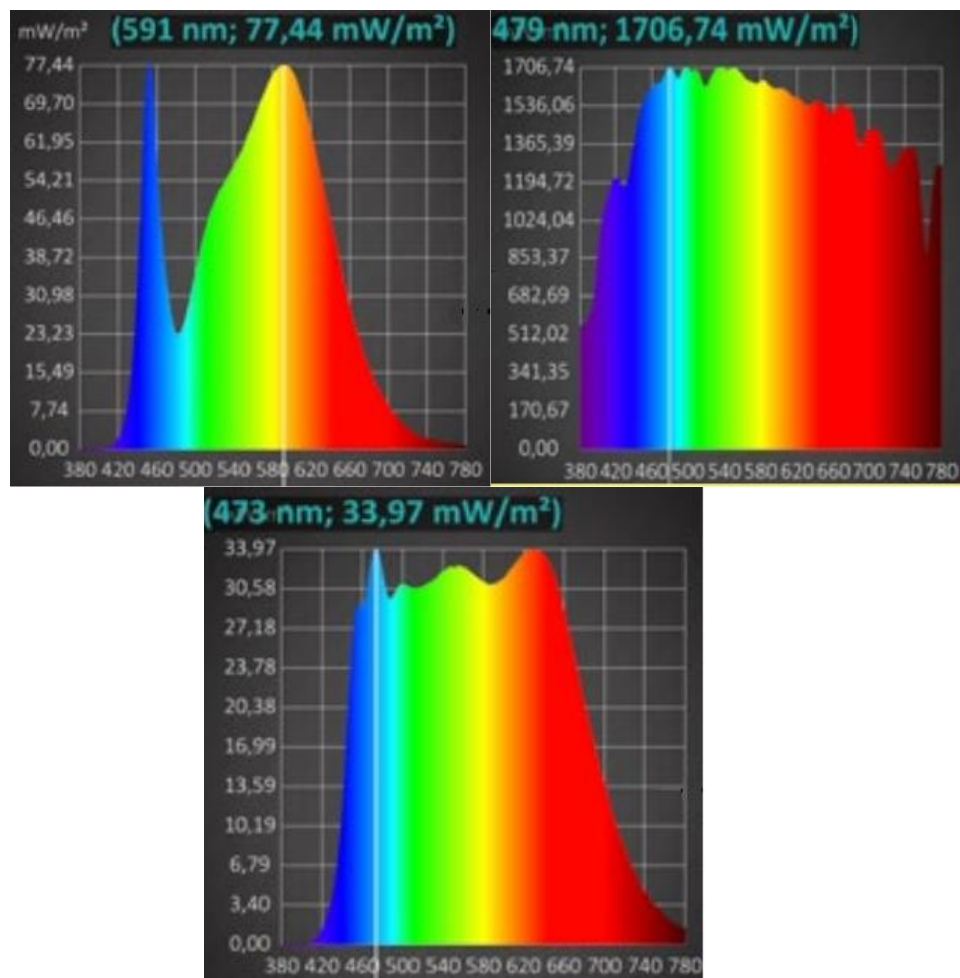


Obr. 21: Spektrum TRI-R technológie od spoločnosti Toshiba v porovnaní so slnečným spektrom. [34]

3.3.3 Spectrasol

Táto spoločnosť zaoberajúca sa pro-kognitívnym osvetlením má v ponuke LED svetelné zdroje s náhradnou teplotou chromatickosti 4400 až 4700 K a spektrálnym zložením, ktoré sa snaží v čo najväčšej možnej miere napodobovať slnečný svit. Toto je dosiahnuté pomocou svetelného LED zdroja, ktorý obsahuje aspoň jeden biely LED čip vyžarujúci svetlo o vlnovej dĺžke 380 až 700 nm s náhradnou teplotou chromatickosti 3800 až 4200 K a aspoň jeden monochromatický LED čip vyžarujúci svetlo o vlnovej dĺžke 490 až 500 nm. Suma modrých a tyrkysových LED čipov tvorí 4,5 až 6 % sumy výkonu bielych LED čipov resp. príkon modrých a tyrkysových LED čipov tvorí 10 až 20 % celkového príkonu. Index podania farieb výrobcu uvádza väčší než 91. Taktiež je deklarované, že spektrum neobsahuje takmer žiadne vlnové dĺžky 400 až 450 nm, ktoré predstavujú tzv. blue light hazard, resp. vyžaruje maximálne 4 % z celkového svetelného toku. [35]

Z obrázku 19 je vidieť, že tento svetelný zdroj možno považovať za plnospektrálny resp. vo veľkej miere podobný spektru slnečného žiarenia. Oproti bežnému LED osvetleniu nie je možné pri tomto type LED čipov pozorovať zvyčajný pokles vo vlnových dĺžkach 460 až 540 nm. Tento pokles je u obyčajných LED čipov spôsobený konvertovaním modrého svetla pomocou vrstvy luminoforu. Plné zastúpenie spektra aj v týchto vlnových dĺžkach jednoznačne podporuje kognitívny výkon u ľudí pracujúcich resp. študujúcich pod týmto osvetlením.



Obr. 22: Spektrálne zloženie obyčajného LED osvetlenia (vľavo hore), slnečného žiarenia (vpravo hore) a pro-kognitívneho osvetlenia značky Spectrasol (dole). [35]

V čase tvorby tejto práce má spoločnosť Spectrasol v ponuke tri LED panely ako náhrady za typické žiarivkové svietidlá, čomu odpovedajú aj rozmery 600x600 (61 W), 1200x300 (60-96 W) alebo 1600x300 mm (80-96 W). Jedná sa o typické rozmery žiarivkových svietidiel. Životnosť je udávaná na 50 000 h a UGR je menšie ako 19. Podľa použitého typu sa svetelný tok pohybuje v rozmedzí 4270 až 6700 lm. Regulácia je možná skrz rozhranie DALI alebo DSI, poprípade analógovým napätím 1 až 10 V. Cena pre LED panel 600x600 mm je v pre máj 2020 10 420 CZK/ks, pre LED panel 1200x300 mm je cena 11 420 CZK/ks a pre LED panel 1600x300 mm je cena 15 870 CZK/ks. Všetky ceny platia pri minimálnej objednávke 50 ks, pričom so zvyšujúcim sa počtom objednaných kusov sa cena znižuje. Ceny sú uvedené bez dopravy, montáže a 21 % DPH. [35]

3.3.4 Philips Hue

Jedným z najväčších priekopníkov na poli osvetľovacích systémov pre smart domácnosť je rada svietidiel Hue od spoločnosti Philips. Medzi ich prednosti patrí možnosť inštalácie do už existujúcich päťíc s typickým závitom E27, a teda tu nevzniká potreba odborného zásahu do osvetľovacieho systému. Ovládanie je možné bezdrôtovo skrz ZigBee komunikačný protokol a pomocou Hue aplikácie, ktorú je potreba nainštalovať do smart zariadenia ako napr. smartphone alebo tablet. Pomocou tejto aplikácie je možné nastavovať svetelné scény pre jednotlivé svetlá, miestnosti alebo aj všetky Hue zariadenia v dosahu. Takýchto zariadení je možné pripojiť až 50 v okruhu cca 30 m. Ovládanie je možné aj hlasovými príkazmi pomocou zariadení Amazon Alexa, Google Home alebo Apple HomeKit. [36]

Jednoduchosti pridávajú aj 3 štartovacie balíčky, konkrétne White and Color Ambiance, White Ambiance a White. Balíček White and Color Ambiance obsahuje dva LED zdroje, každý o výkone 9 W spolu s tzv. mostíkom, čo je riadiaca jednotka, ktorú je potrebné zapojiť do siete a taktiež pomocou krútenej dvojlinky do WiFi routeru. Súčasťou balenia je aj bezdrôtový stmievač, ktorému je možné skrz mostík priradiť ovládanie rôznych scén pri zapnutí. Ako z názvu vyplýva, stmievanie je taktiež jednou z možností využitia tohto spínacieho prvku. V aplikácii Hue je možné si nastaviť denné rutiny, tj. zmenu svetelných parametrov v závislosti na čase. Svetelný tok týchto LED zdrojov je 806 lm a T_c je možné nastaviť v rozmedzí 2000 až 6500 K. Spolu so zmenou chromatickosti je možné aj nastavenie až 16 miliónov farieb. Životnosť je udávaná na 25 000 hodín alebo 50 000 zapnutí. [36]

V balíčku White Ambiance sa nachádzajú tri svetelné zdroje o výkone 3x9 W a nastaviteľnou teplotou chromatickosti v rozmedzí 2700 až 6500 K. Ostatné parametre a možnosti pripojenia ďalšieho príslušenstva je identické ako pri balíčku White and Color Ambiance.

Balíček White obsahuje taktiež 3 ks LED svetelných zdrojov o výkone 3x9 W, avšak tentokrát je náhradná teplota chromatickosti pevne nastavená na 2700 K.



Obr. 23: Balíček White and Color Ambience rady Hue od spoločnosti Philips.
[36]

Cena týchto štartovacích balíčkov ktoré obsahujú v prípade White and Color Ambience mostík Hue Bridge, stmievač Hue Dimmer switch a dve 9 W Hue LED zdroje je pre máj 2020 na internetovom obchode alza.sk 152 € s DPH. Pre balíček White Ambience s podobným príslušenstvom ako v predchádzajúcom balíčku ale s tromi 9 W LED zdrojmi je cena na tom istom eshope 129 € s DPH. Cena posledného balíčku White s identickým príslušenstvom ako v prípade White Ambience je 101 € s DPH. [36]

Vďaka možnosti riadenia teploty chromatickosti v dostatočne širokom intervale a intenzity osvetlenia v závislosti na čase v prípade balíčkov White and Color Ambience a White Ambience je tento systém možno považovať za systém ktorý dokáže podporovať kognitívne funkcie. Ako pozitívum možno vnímať aj možnosť zakomponovania pohybového senzoru, ktorý je možné pripojiť skrz mostík a vytvoriť tak systém s novými možnosťami automatizácie. Ďalej je možnosť pripojiť do tohto systému aj LED pásiky, ktorými sa dajú vytvárať nové svetelné scény, ktoré budú lepšie vyhovovať individuálnym požiadavkám užívateľa. Tento LED pás s maximálnym svetelným tokom 700 lm má taktiež možnosť regulácie teploty chromatickosti v intervale 2200 až 6500 K. Jeho cena je 75 € s DPH. [36]

3.3.5 Ikea Trådfri

Na trh s inteligentným osvetlením vstúpila po holandskom korporáte Philips aj švédsky nábytkársky gigant Ikea, pričom sa od začiatku snažila poskytovať alternatívu ku osvetleniu Hue od Philipsu. Svoju ponuku svetelných zdrojov však má spracovanú formou tzv. rebrandingu, čo spočíva v zadaní špecifikácii výrobcovi svietidiel, ktorý sa postará o dodanie požadovaného produktu. Je to logický krok nakoľko je Ikea najmä nábytkárska firma, čo sa však aj odrazilo v prepracovanosti výsledného produktu.

Podobne ako u Philipsu je pozitívom jednoduchá inštalácia, nakoľko stačí len vymeniť pôvodné staré žiarovky s päticou E27 za LED zdroje Trådfri. S takouto päticou má Ikea v ponuke štyri LED zdroje s o svetelných tokoch 250, 600, 806 a 1000 lm. Možnosť zmeny teploty chromatickosti však ponúkajú len zdroje 600, 806 a 1000 lm.

Pri 600 lm zdroj je možné meniť náhradnú teplotu chromatickosti len skokovo a to na hodnoty 1700, 2200, 2700, 3000, 4000, 5000 a 6000 K. Mimo to je možné voliť aj medzi 20 rozličnými farbami. Spotreba je uvádzaná na 8,6 W a index podania farieb je 90. Cena je pre máj 2020 daná na 20 € s DPH.

806 lm zdroj umožňuje podobne ako v predchádzajúcom prípade len skokovú zmenu T_c , avšak v menšom rozsahu aj menšom počte. Konkrétne na 2200, 2700 a 4000 K. Spotreba je uvádzaná na 9 W. Index podania farieb nie je uvedený a cena je stanovená na 15 € vrátane DPH.

Posledný ovládateľný 1000 lm zdroj ponúka identické zmeny teploty chromatickosti ako pri 806 lm zdroji. Spotreba je 11 W a index podania farieb je 90. Cena ostáva na 15€ vrátane DPH. [37]



Obr. 24: 806 lm LED zdroj Ikea Trådfri spolu s diaľkovým ovládaním a stmievačom. [37]

Všetky spomenuté LED svetelné zdroje je potrebné prepojiť s prenosovou bránou. Tá sa podobne ako u Philips Hue pripája ethernetovým káblom k routeru a napájacím káblom do elektrickej siete. Samotné ovládanie je možné viacerými spôsobmi. Skrz aplikáciu IKEA Home Smart, diaľkové ovládanie alebo pomocou stmievača. Oproti Hue systému je možné ovládať pomocou jedného diaľkového ovládača len maximálne 10 svetelných zdrojov. Nevýhodou môže byť aj skutočnosť, že každá takáto skupina musí mať vlastné diaľkové ovládanie tzn. na ovládanie skupiny svietidiel v jednej miestnosti je potreba mať jedno diaľkové ovládanie a pre inú miestnosť zase ďalší diaľkový ovládač. Cena bezdrôtového snímača je 6 € s DPH a diaľkový ovládač je možné zakúpiť za 12 € s DPH. Prenosová brána má cenu 30 € vrátane DPH. [37]

3.3.6 Vitae Light

Relatívnou novinkou na trhu je svetelný LED zdroj Vitae Light. Tento český produkt vznikol ako výsledok snahy Hynka Medřického o zdravšie svetelné prostredie v interiéroch budov. Podobne ako v predchádzajúcich prípadoch je aj tu inštalácia jednoduchá vďaka pätici E27. Na rozdiel od predchádzajúcich prípadov Vitae Light neponúka možnosť ovládania pomocou mostíku alebo mobilnej aplikácie. Dôvodom je eliminácia spotreby energie a vyžarovania elektromagnetického žiarenia. Produkty z rád Philips Hue a Ikea Trådfri po vypnutí v aplikácii alebo skrz iné ovládacie zariadenia nie sú absolútne vypnuté ale v standby móde, pripravené prijať impulz pre zapnutie. U Vitae Light je tento problém odstránený ovládaním pomocou už existujúceho

nástenného vypínača. Pomocou neho je možné prepnúť tento LED zdroj do 3 stavov, Prepínanie funguje na princípe rýchleho vypnutia a zopnutia vypínača, čo elektronika v LED zdroji vyhodnotí ako pokyn na prepnutie režimu. Týmto spôsobom možno cyklicky prepínať medzi jednotlivými stavmi LED zdroja. [38]

V prvom stave je Vitae Light v stave *oranžová*. V tomto stave má príkon 1,9 W a svetelný tok len 10 lm. V tomto stave nie je výrobcom uvedená náhradná teplota chromatickosti a ani index podania farieb, avšak je deklarované, že v tejto fáze svetlo nevyžaruje vlnové dĺžky kratšie než 550 nm, čo v praxi predstavuje zelené a modré vlnové dĺžky. Pre zaistenie nenarušenia cirkadiánneho rytmu je toto zároveň počiatočným stavom, ktorým sa LED zdroj opäťovne rozsvieti po 11 sekundách vo vypnutom stave. Odoberaný prúd je v tomto prípade 8 mA. Tento stav je ideálny používať v období cca 90 minút pred zvyčajným časom zaspátia, pre prirodzené zvýšenie hladiny melatonínu v ľudskom organizme. [38]

Druhý stav je stav *teplá biela*, kedy je $T_c = 2700\text{ K}$ a index podania farieb je väčší ako 96. Podiel modrej zložky je uvádzaný ako znížený. Príkon je v tomto prípade 5,2 W a odoberaný prúd je 22 mA. Svetelný tok sa oproti predchádzajúcemu stavu zvýšil na 300 lm. V tomto stave je na mieste relaxácia a odpočinok. [38]

Tretí a zároveň posledný stav je stav *studená biela*. $T_c = 4000\text{ K}$ a index podania farieb je identický s predchádzajúcim prípadom a teda má hodnotu viac ako 96. Spektrum je tu uvádzané ako rovnomerné s vyrovnaným podielom modrej a červenej zložky. Príkon je udávaný na 6,8 W a odoberaný prúd je 29 mA. Svetelný tok sa taktiež zvýšil a dosahuje hodnoty 440 lm. Tento stav je najlepší pre maximalizáciu kognitívneho výkonu, bdlosti a pohotovosti. [38]



Obr. 25: LED zdroj Vitae Light a prenajímateľná lampa s klipom. [38]

Cena je daná na 1990 CZK s DPH za jeden kus, avšak je možné zakúpiť si sadu štyroch týchto LED zdrojov za sumu 6700 CZK s DPH. Zaujímavou alternatívou ku kúpe tohoto LED zdroja je tzv. bulbsharing. Jedná sa o prenájom zdroja Vitae Light za 45 CZK na jeden mesiac, pričom maximálna doba prenájmu je neobmedzená. Je však potrebné zaplatiť vratnú zálohu 300 CZK. V prípade poškodenia je garantované zaslanie nového LED zdroja Vitae Light. Tak isto je možné si prenajať aj lampy s klipovým úchytom za rovnakú maržu ako pri LED zdroji, avšak vratná kaucia je daná na 500 CZK. [38]

Na webových stránkach predajcu nebolo možné nájsť spektrum vlnových dĺžok tohto LED zdroja pre jednotlivé stavy. Je však pravdepodobné, že spektrum v stave *studená biela* bude podobné spektru pri LED paneloch Spectrasol, nakoľko pán Medřický stojí za oboma týmito projektami. Bolo by však potrebné toto tvrdenie potvrdiť alebo vyvrátiť meraním.

4. Návrh testovania vplyvu svetla na kognitívny výkon

V tejto poslednej kapitole bude navrhnuté testovanie vplyvu svetla na kognitívny výkon človeka. Toto testovanie si kladie za úlohu zdefinovať parametre a postupy, ktoré by mali čo najobjektívnejšie otestovať vplyv dvoch typov svetelných zdrojov na kognitívny výkon.

4.1 Požiadavky

- 1. Výber vhodnej vzorky účastníkov testovania.**
- 2. Výber vhodného prostredia pre vykonanie testovania.**
- 3. Výber vhodných svetelných zdrojov použitých pri testovaní.**
- 4. Vytvorenie konkrétneho systému testovania.**
- 5. Zber výsledkov a vyhodnotenie testovania.**

4.2 Analýza požiadaviek

1. Výber vhodnej vzorky účastníkov testovania.

Účastníci testovania by mali byť ideálne študenti stredných alebo vysokých škôl, poprípade ľudia pracujúci v prostredí, ktoré si vyžaduje značnú mieru kognitívneho výkonu; pracovníci v laboratóriách, zdravotnícky personál, vrcholový manažment, projektantské kancelárie, atď. Zmyslom výberu vhodných účastníkov je ich schopnosť adekvátne subjektívne ohodnotiť vplyv pro-kognitívneho osvetlenia, nakoľko sa takmer denne nachádzajú v prostredí, ktoré si vyžaduje ich sústredenosť, bdelosť a pozornosť.

Účastníci by mali toto testovanie podstúpiť dobrovoľne a s vedomím, že sa takéhoto testovania zúčastňujú. Účastníci by nemali byť ľudia trpiaci zdravotnými problémami, ktoré by mohli mať vplyv na testovanie, resp. u ktorých by nebolo možné riadne ohodnotiť vplyv pro-kognitívneho osvetlenia. Jedná sa napr. o osoby so závažným mentálnym, zrakovým alebo telesným postihnutím. Samozrejmosťou je tá istá vzorka účastníkov počas celej doby trvania experimentu.

2. Výber vhodného prostredia pre vykonanie testovania.

Prostredie v ktorom sa vykonáva testovanie by malo byť prispôsobené pre toto testovanie, avšak nie do takej miery aby neodzrkadľovalo prirodzené prostredie v ktorom účastníci testovania bežne vykonávajú svoju prácu resp. štúdium. Nemali by sa v ňom vyskytovať príliš rušivé elementy ako napr. častý pohyb či už ľudí alebo predmetov, hlasná alebo nepríjemná hudba či zvuk, vibrácie, zápachy alebo vône, extrémne teploty alebo ich zmeny počas testovania.

Toto prostredie by malo zároveň umožňovať vytvorenie podmienok potrebných pre vykonanie testovania, tj. musí byť umožnené umiestnenie potrebných pomôcok, svetelných zdrojov a testovaných subjektov do takej pozície a polohy aby bolo možné riadne testovanie a následný zber dát. Tento priestor musí byť schopný zabrániť akémukoľvek inému zdroju svetla, vrátane slnečného, aby marilo priebeh a výsledky testovania. V prípade ak je potrebná prítomnosť osoby, ktorá sa testovania zúčastňuje nie ako testovaný subjekt ale ako dozor, musí to byť umožnené.

3. Výber vhodných svetelných zdrojov použitých pri testovaní.

Pri testovaní je potrebné použiť dva rôzne svetelné zdroje.

Prvý referenčný zdroj by mal byť bežný svetelný zdroj, ktorý si nekladie za úlohu zlepšovať ani nijakým iným úmyselným spôsobom ovplyvňovať kognitívny výkon či už v pozitívnom alebo negatívnom slova zmysle. Malo by sa jednať o svetelný zdroj bežne prítomný v priestoroch, v ktorých sa testované subjekty denne nachádzajú, aby sa vytvorili svetelné podmienky čo najvernejšie svetelným podmienkam v učebniach resp. na pracovisku.

Druhý testovaný zdroj by mal byť zdrojom pro-kognitívnym, teda takým ktorý si kladie za úlohu zlepšovať kognitívny výkon človeka. Typicky by to mal byť zdroj, s náhradnou teplotou chromatickosti aspoň 4000 K, ktorý zaisťuje rovnomerné zastúpenie všetkých vlnových dĺžok minimálne v intervale od 450 do 650 nm s maximálnou odchýlkou $\pm 15\%$. Jedná sa teda o zdroj, ktorý má spektrálne zloženie blízke dennému svetlu. Tým sa zaisťí dostatočná stimulácia všetkých fotoreceptorov v oku a zároveň bude zaistené aj vysoké podanie farieb, spolu s menšou celkovou únavou testovaných subjektov.

V oboch prípadoch je potrebné zmerať svetelné parametre týchto zdrojov. Konkrétne, avšak nie výlučne, náhradnú teplotu chromatickosti, svetelný tok, intenzitu osvetlenia na horizontálnej pracovnej rovine ale aj na vertikálnej rovine vo výške očí sediaceho človeka a svetelné spektrum vyžarovaných vlnových dĺžok.

4. Vytvorenie konkrétneho systému testovania

Je potreba vytvoriť systém testovania, ktorý bude schopný kvantifikovať vplyv osvetlenia v troch častiach.

Prvou časťou bude zaznamenanie dát testovaných subjektov, ktoré môžu mať vplyv na kognitívny výkon a celkovú výkonnosť. Jednalo by sa o základné údaje v súvislosti s ich svetelnou hygienou ako napr. doba a čas pobytu na dennom svetle, svetelné podmienky na konkrétnom mieste na pracovisku resp. v škole, typ a obtiažnosť vykonávanej činnosti na danom mieste, doba spánku so zvyčajnými časmi zaspátia a prebudenia, subjektívna kvalita spánku, atď.

V druhej časti bude pomocou dotazníku subjektívne ohodnotené vnímanie svetla účastníkmi testovania. Jednalo by sa o ohodnotenie svetelného prostredia resp. miestnosti v ktorej bude testovanie vykonávané a ohodnotenia svojho súčasného fyzického a psychického stavu pomocou dotazníkov.

Tretia časť testovania budú dva kognitívne testy. Prvý test by mal ohodnotiť rýchlosť rozhodovania a schopnosť sústredenia pri riešení časovo obmedzenej a na pozornosť náročnej úlohy. Druhý test by sa mal zamerať na krátkodobú pamäť ako napr. zapamätanie si určitých pojmov alebo skupín čísel za daný čas a následné vyvolanie a prácu s týmito pojmami resp. číslami. Testovanie by malo byť vykonávané s dostatočnými časovými rozstupmi medzi zmenami typov osvetlenia ale aj medzi jednotlivými dňami konania testovaní. Týmto by sa malo zabrániť vplyvu krytia možných účinkov jednotlivých typov osvetlenia a zároveň za zabezpečí dostatočný počet meraní, ktoré poskytnú hodnovernejšie výsledky.

5. Zber výsledkov a vyhodnotenie testovania.

Na záver testovania je potrebné zozbierané dáta vyhodnotiť a vysloviť záver, či má alebo nemá pro-kognitívne osvetlenie vplyv na kognitívny výkon človeka a ak má tak v akej miere. Výsledky je potrebné vyobraziť v zrozumiteľnej forme buď pomocou prehľadných grafov alebo tabuliek a to pre každého účastníka testovania zvlášť.

4.3 Návrh testovania

1. Účastníci testovania

Účastníci testovania budú vybraní spomedzi študentov VUT FEKT, ktorý prejavia záujem a ochotu zúčastniť sa testovania resp. viacerých testovaní. Dôvodom výberu študentov tejto fakulty je splnenie podmienky ich denného styku s prostredím a situáciami, ktoré vyžadujú zvýšený kognitívny výkon. Z toho zároveň vyplýva ich schopnosť vyhodnotiť mieru vplyvu osvetlenia na ich kognitívny výkon. Skutočnosť, že sú študentmi na FEKT-e znižuje pravdepodobnosť absencie na niektorom z testovaní, nakoľko samotné testovanie bude vykonávané v laboratóriu svetelnej techniky v budove FEKT-u na UEEN. Dôvody výberu tohto laboratória budú rozobrané v ďalšom bode. Účastníkov testovania bude šesť nakoľko tento počet by mal byť dostatočný pre zaistenie relevantného množstva údajov od viacerých účastníkov. Každý z účastníkov predstavuje individualitu v zmysle miery, akou môže pro-kognitívne osvetlenie ovplyvňovať alebo neovplyvňovať kognitívny výkon, čo predstavuje žiadanú rôznorodosť vo výsledkoch a tým pádom aj lepšiu možnosť uplatnenia výsledkov na iných ľuďoch. Zároveň to nie je počet pri ktorom by mohlo byť vysoké riziko absencie v dohodnuté dni a časy testovania.

2. Testovacie prostredie

Testovanie bude prebiehať v priestoroch laboratória svetelnej techniky. Dôvodov pre výber tohoto laboratória je viacero:

- dostupnosť účastníkom testovania, ktorí sú zároveň študentami na FEKT-e, kde sa laboratórium nachádza,
- široká škála meracích prístrojov, ktoré sú potrebné pri meraní ako napr. luxmeter, spektrofotometer a chromameter,

- možnosť konzultácie s odbornými pracovníkmi laboratória,
- možnosť vytvorenia požadovaných svetelných podmienok, vďaka možnosti blokácie až eliminácie denného svetla pomocou sústavy čiernych závesov a taktiež aj kvôli skutočnosti, že drvivá väčšina povrchov vrátane stien, stropu podlahy a nábytku je natretá čiernou bezodraznou farbou resp. podlaha je potiahnutá kobercom.

V laboratóriu budú zaistené miesta na sedenie spolu s pracovným stolom, ktoré sú bežnou súčasťou učební na FEKT-e. Vzájomné umiestnenie jednotlivých pracovných stolov bude také, aby bolo zaistené optimálne pôsobenie svetelných zdrojov, tj. aby svetelné zdroje osvetľovali pracovné plochy aj účastníkov testovania s dostatočnou intenzitou. V testovaní vykonanom Ing. arch. Lenkou Maierovou, Ph.D., na Gymnáziu Na Pražačke, v ktorom sa venovala vplyvu pro-kognitívneho svetla na kognitívny výkon študentov, bola použitá intenzita osvetlenia pracovnej plochy 800 ± 100 lx. Podľa normy ČSN EN 73 0580-3 Denní osvětlení budov, Část 3: Denní osvětlení škol je požadovaná intenzita osvetlenia 500 lx. Je teda zrejmé, že túto intenzitu osvetlenia možno považovať za dostačujúcu a preto bude v tomto testovaní taktiež použitá intenzita osvetlenia v intervale 800 ± 100 lx.

Svetelné zdroje budú umiestnené v lampách s klipom spomínané v kapitole 4.4.6 Vitae Light. Tieto lampy disponujú päticou E27 a ich klip umožní jednoduché umiestnenie lampy do požadovanej pozície.

3. Svetelné zdroje

Budú použité dva svetelné zdroje.

Prvý referenčný zdroj resp. zdroje budú 8 W LED zdroje od spoločnosti Philips s $T_c = 2700$ K a svetelným tokom 806 lm. Sklo je matné biele. Disponujú klasickým závitom E27 a napájané sú zásuvkovým napätím 230 V, takže ich inštalácia si nevyžaduje potrebu špeciálnych pätíc alebo predradníkov. U tohoto zdroju nie je uvádzaný výrobcom akýkoľvek vplyv na kognitívny výkon človeka. Jedná sa o typický svetelný zdroj, ktorý môže byť bežne používaný na osvetľovanie aj v priestoroch, kde sú kladené zvýšené nároky na kognitívny výkon, ako napr. školské učebne.



Obr. 26: Sada 8 W LED zdrojov od spoločnosti Philips s $T_c = 2700$ K a svetelným tokom 806 lm.

Táto súprava šiestich kusov sa v čase písania tejto práce predáva na internetovom obchode alza.sk za 13 € s DPH, čo predstavuje cca 350 CZK.

Druhý pro-kognitívny zdroj resp. zdroje budú 7 W LED zdroje Vitae Light s $T_c = 4000$ K a svetelným tokom 440 lm. Sklo je aj v tomto prípade matné biele a podobne ako v predchádzajúcom prípade disponujú závitom E27 a možnosťou napájania 230 V zo siete. V kapitole 4.4.6 Vitae Light je spomenuté, že tento zdroj je možné prepínať do troch rôznych stavov, ktoré sa vzájomne líšia svetelným tokom a náhradnou teplotou chromatickosti. Nakoľko v tomto testovaní ide o zistenie vplyvu na kognitívne funkcie, bude tento LED zdroj používaný výhradne v stave *studená biela*, pri ktorom je uvádzaný pozitívny vplyv na kognitívne funkcie človeka.

Vďaka službe bulbsharing, spomenutej v kapitole 4.4.6 Vitae Light, je možné si na internetovej stránke www.bulbsharing.com prenajať ako svetelné zdroje Vitae Light, tak aj vyššie spomínané lampy s klipom. Vďaka jednotnej konštrukcii a materiálu odrazných plôch lúčov sa môže vylúčiť vplyv rozdielnych typov svietidiel na meranie.

Zo skutočnosti, že Vitae Light má o takmer polovicu menší svetelný tok než LED zdroj Philips vyplýva, že je potrebný takmer dvojnásobný počet svetiel Vitae Light oproti LED zdrojom Philips. Ak vezmeme do úvahy fakt, že testovanie bude

vykonávané na skupine šiestich účastníkov, môžeme navrhnúť aby mal každý účastník testovania vlastný LED zdroj Philips, čo predstavuje celkový svetelný tok 4836 lm. Pre zachovanie rovnakého svetelného toku aj pri použití LED zdrojov Vitae Light, je potreba použiť jedenásť týchto zdrojov. Suma svetelného toku v tomto prípade predstavuje 4840 lm, čo je takmer identické číslo, pričom rozdiel štyroch luxov nepredstavuje odchýlku, ktorá by mohla mať vplyv na výsledky merania. Je teda potrebné zapožičanie jedenástich kusov LED zdrojov Vitae Light ako aj lúč s klipom. Celková suma za požičanie jedenástich kusov LED zdrojov Vitae Light a rovnaký počet lúč s klipom na jeden mesiac, počas ktorého by boli vykonané merania by bola 9790 CZK resp. 366 €. Po vrátení zapožičaných produktov by bola vrátená kaucia vo výške 8800 CZK resp. 329 €. Reálne vynaložené náklady by teda predstavovali 990 CZK, čo predstavuje cca 37 €. Ceny za požičanie LED zdrojov aj lúč sú uvedené v kapitole 4.4.6 Vitae Light.

Testovaniu účastníkov pri oboch typoch svietidiel musí predchádzať meranie náhradnej teploty chromatickosti a svetelného toku, ktoré stačí vykonať len raz pre každý LED zdroj. Pred každým testovaním účastníkov je potrebné zmerať intenzitu osvetlenia na pracovnej ploche, ktorá sa musí nachádzať v intervale 800 ± 100 lx. Taktiež je potrebné intenzitu osvetlenia vertikálnej plochy vo výške očí sediacich účastníkov testovania. Výsledky z merania, vrátane svetelných spektier oboch LED zdrojov je potrebné doložiť ako súčasť testovania.

Pre zaistenie dostatočnej stimulácie daným typom osvetlenia budú účastníci umiestnený v osvetlenom testovacom priestore po dobu minimálne 10 minút pred začiatkom testovania. Samozrejmosťou je že pod daným osvetlením budú účastníci počas celej doby vyplňania dotazníku *B*. a kognitívnych testov *C1*. a *C2*.

4. Systém testovania

Ako už bolo spomenuté tento systém bude pozostávať z troch častí.

A. Základné údaje o účastníkoch testovania

Údaje sa získajú pomocou jednoduchého dotazníku, ktorý bude potrebné vyplniť len raz na začiatku testovania. Tento dotazník bude obsahovať základné informácie o účastníkoch testovania, ktoré by mohli mať potenciálny vplyv na ich kognitívny výkon z hľadiska ich dlhodobých spánkových návykov, bežného pracovného prostredia, zvyčajných svetelných podmienok, atď.

B. Subjektívne hodnotenie svetelných podmienok

Tento dotazník bude slúžiť na zber dát, ktorými budú subjektívne hodnotenia svetelných podmienok v testovacom priestore, vytvorenými v danej chvíli použitým typom osvetlenia. Zároveň v ňom uvedú hodnotenie ich aktuálneho fyzického a psychického stavu.

C. Kognitívne testy

C1. Test pozornosti – d2 test

Test pozornosti d2 predstavuje metódu určenú k meraniu pozornosti, hlavne v zmysle pozornosti selektívnej. Princíp spočíva v schopnosti testovaného účastníka rozlišovať medzi podobnými zrakovými podnetmi. Touto metódou je pritom možné merať ako rýchlosť a množstvo práce skrz počet spracovaných písmen, tak aj chyby spôsobené vynechaním správnej položky resp. označením nesprávnej položky. Priamo je teda testovaná schopnosť riadenia pozornosti, presnosť zrakového rozlišovania a kognitívna prispôsobivosť. [33,36]

Celkovo možno v tomto teste sledovať 3 zložky výkonu:

1. rýchlosť a množstvo vykonanej práce, tj. počet položiek spracovaných za určitú dobu,
2. kvalita vykonanej práce, tj. stupeň presnosti, ktorý je v opačnom pomere ku počtu chýb,
3. pomer rýchlosti a presnosti vykonanej práce.

Test sa skladá zo 14 riadkov po 47 znakov, čo nám dáva 658 položiek. Jedná sa o písmená *d* a *p* s jednou alebo dvoma zvislými čiarkami nad alebo pod písmenom.

V teste sa nevyskytujú písmená bez čiarok a tým pádom je možných šesť rôznych kombinácií pre každé písmeno, čo nám dáva dvanásť rôznych znakov. Od testovaného sa vyžaduje aby postupne prechádzal jednotlivé riadky a vyškrtnal v nich všetky písmená *d* s dvoma čiarkami. Z toho vznikol aj názov *d2 test*. Všetky ostatné znaky sa považujú za nepatričné a nemajú byť zaškrtnuté. Je povolená oprava pri chybnom zaškrtnutí a to výrazným zaškrtnutím svojej pôvodnej voľby. [36]

Test sa vyhodnocuje pomocou dvoch skórovacích šablón, ktoré pomáhajú examinátorovi spočítať počet správne označených znakov a aj počet chýb v zmysle vynechania alebo chybného zaškrtnutia. Je možné vypočítať:

- CP (celkový počet) – súčet všetkých položiek, ktoré testovaný v priebehu trvania skúšky prešiel,
- Ch (chyby v CP) – počet chýb v celkovom počte prejdených znakov,
- Ch% (percento chýb v CP) – umožňuje lepšie interpretovať presnosť výkonu,
- CV (celkový výkon) – je rozdiel CP a Ch,
- VS (výkon sústredenia) – rozdiel celkového počtu správne zaškrtnutých položiek a počtu chýb vzniknutých nesprávnym zaškrtnutím položky; spolu s CV sú mierami pozornostného výkonu v priebehu testu,
- FR (fluktučné rozpätie) – vyjadruje stabilitu a konzistenciu výkonu v priebehu testu. [36]

C2. Test krátkodobé paměti

Tento test bude sledovať schopnosť zapamätania si série 10 francúzskych hracích kariet. Karty budú pozostávať buď zo série číselných hodnôt (2 až 9) a obrazných hodnôt (J až A). Karty budú účastníkovi odhalené všetky naraz a od toho okamihu začne plynúť doba 1 minúty, počas ktorej sa budú účastníci usilovať o čo najlepšie zapamätanie si číselných resp. obrazných hodnôt a farieb všetkých kariet. Po uplynutí jednej minúty budú karty pred účastníkov odobrané a následne budú účastníci požiadaní aby tieto karty zapísali spôsobom uvedeným na testovacom papieri, napr. vzostupne/zostupne, zoskupenie podľa farieb, zoskupenie podľa párnosti/nepárnosti, atď. Odpovede budú účastníci zaznamenávať na papier podľa pokynov uvedených na testovacom papieri. Doba pre zapísanie výsledkov bude 1 minúta.

5. Zber a vyhodnotenie výsledkov

Zber výsledkov je možný okamžite po vykonaní každého testovania. Nakoľko výsledky testovania každého účastníka budú výlučne v papierovej forme je dôležité tieto papierové hárky uchovať a zároveň prepísať a uložiť v elektronickej forme. Na uloženie a grafické znázornenie údajov v tabuľkách a grafoch postačuje tabuľkový procesor MS Excel. Vďaka nízkemu počtu účastníkov testovania nie je potrebné vytvárať komplikované databázy alebo iné nástroje na spracovávanie dát.

Výsledky by mali byť spracované pre každého účastníka programu samostatne, ako aj pre skupinu ako celok. S informáciami poskytnutými účastníkmi programu by malo byť nakladané s diskretnosťou a s ohľadom na ochranu osobných údajov.

Na spracovanie týchto výsledkov nie je potrebný žiadny špeciálny program, avšak je potrebná literatúra ku spracovaniu výsledkov testov pozornosti d2.

Pre lepšiu predstavu vzájomnej pozície svetiel a pracovných stolov je žiaduce vytvoriť svetelný model miestnosti v niektorom zo svetelných simulačných programov ako napr. RELUX.

Výsledky by mali byť spracované a prezentované v takej forme, ktorá poskytne dostatočné množstvo informácií, z ktorých bude možné vyvodiť záver či pro-kognitívne svetlo má alebo nemá vplyv na kognitívny výkon človeka.

Priebeh a výsledky jednotlivých meraní je ideálne priebežne konzultovať s niektorými z pracovníkov laboratória svetelnej techniky alebo iných odborníkov z praxe, venujúcim sa danej problematike. Ich prípadné odôvodnené poznámky a odporúčania je vhodné zakomponovať do testovacieho procesu, resp. ho upraviť podľa týchto odporúčaní.

A. Základné údaje o účastníkoch testovania

Meno a priezvisko:.....

Pohlavie: M/Ž

Dátum narodenia:.....

Adresa:.....

Emai:.....

Mobil:.....

Dátum:.....

Pravdivé odpovede zakrúžkujte alebo dopíšte tlačným písmom.

Koľko dní v týždni trávite vonku na dennom svetle?: <1 1-2 3-4
>5

Ak trávite dni na dennom svetle, aký je hodinový priemer za deň?: <1 1-2 3-4
>5

Ak trávite čas na dennom svetle, v ktorej fáze dňa je to najčastejšie?: 6:00-9:59
10:00-13:59
14:00-17:59
18:00+

Máte na vašom pracovisku/škole výhľad na okno, skrz ktoré je aspoň z ½ vidieť oblohu?: Áno Nie

Ak áno, je pozícia vášho pracovného stolu pri takomto okne?: Áno Nie

Preniká skrz toto okno pre vás dostatočné množstvo svetla?: Áno Nie

V čase nedostatku denného svetla, považujete osvetlenie na vašom pracovnom stole za dostatočné?: Áno Nie

Uved'te v akom čase sa najčastejšie nachádzate v interiery počas pracovného týždňa:

6:00-9:59

10:00-13:59

14:00-17:59

18:00+

Uved'te zvyčajný čas zaspávania a vstávania počas pracovného týždňa:

Vstávanie:.....

Zaspávanie:.....

Cítite sa po spánku odpočinutý?:

Áno Nie

Uved'te v akom časovom intervale ste podľa vás najproduktívnejší:

Čas:.....

Považujete sa skôr za „ranné vtáča“ alebo „večernú sovu?:

vtáča sova

Zažívate počas týždňa social jet lag?:

Áno Nie

Ak áno, uved'te zvyčajný čas zaspávania a vstávania počas víkendu:

Vstávanie:.....

Zaspávanie:.....

Trpíte akýmkoľvek spánkovými poruchami? Ak áno uved'te:.....

B. Dotazník

Meno a priezvisko:.....

Dátum hodnotenia:.....

Miesto hodnotenia:.....

Adekvátne odpovede zakrúžkujte (1 – absolútne nesúhlasím, 9 – absolútne súhlasím).

Hodnotenie aktuálneho fyzického a psychického stavu

Momentálne sa cítim zdravý: 1 2 3 4 5 6 7 8 9

Momentálne sa cítim bdely: 1 2 3 4 5 6 7 8 9

Momentálne sa cítim uvoľnený: 1 2 3 4 5 6 7 8 9

Momentálne sa cítim sýty: 1 2 3 4 5 6 7 8 9

Momentálne mám náladu dobrú: 1 2 3 4 5 6 7 8 9

Pripadá mi, že v miestnosti je čerstvého vzduchu dostatok:

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Subjektívne hodnotenie svetelných podmienok

Osvetlenie v miestnosti mi pripadá príjemné:

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Miestnosť je dostatočne jasne osvetlená: 1 2 3 4 5 6 7 8 9

Svetlo by som charakterizoval ako teplé: 1 2 3 4 5 6 7 8 9

V miestnosti sa nachádzajú rušivé odrazy:

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Farby mi v tomto prostredí pripadajú prirodzené:

1 2 3 4 5 6 7 8 9

C2. Test krátkodobé paměti

Karty zaznamenávajíte v poradí hodnota (2 až A) a farba (srdcia – S, piky – P, káry – K, kříže – R) napr. 5K, 8R, JS, atd’.

Zoskupte/zorad’te vami zapamätané karty:

- a) párne, od najmenšej hodnoty po najväčšiu hodnotu

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

- b) podľa farieb tzn. všetky hodnoty spoločnej farby vypíšte do jedného riadku

- c) striedavo párne a nepárne od najväčšej hodnoty po najmenšiu

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Záver

Cieľom tejto diplomovej práce je rozobrať problematiku osvetľovacích sústav zameraných na zvyšovanie kognitívnych funkcií. Je rozdelená do viacerých častí od popisu vplyvu svetla na človeka, cez problematiku cirkadiálneho systému až po technológie osvetľovania, ktoré zvyšujú kognitívny výkon človeka. Ako posledné je navrhnuté testovanie takéhoto osvetľovacieho systému.

Pre správny návrh cirkadiálneho osvetľovania je potrebné pochopiť ako funguje vizuálny aj nevizuálny systém spracovávania svetelných informácií. Dôležitým faktom je, že na sietnici ľudského oka sa nenachádzajú len tyčinky a čapíky zodpovedné za vizuálne spracovanie signálu, ale aj tretí typ buniek, ktoré majú priamy vplyv na cirkadiálny rytmus. Týmito bunkami, objavenými v roku 2007, sú ipRGC, v preklade vnútorne fotosenzitívne sietnicové gangliové bunky. Ako bolo dokázané ich maximálna relatívna spektrálna citlivosť sa nezhoduje so spektrálnou citlivosťou tyčiniek, ktorá je na 513 nm, ani čapíkov, ktoré majú maximum pri 555 nm. Maximálnu citlivosť majú tieto bunky pri 450 nm, čo odpovedá modrej farbe.

Cirkadiálny rytmus, je problematikou preberanou v druhej časti tejto práce. Cirkadiálny rytmus je prirodzený rytmus s 24 hodinovou periódou, kedy dochádza ku zmenám v nie len ľudskom organizme. Tieto zmeny zahŕňajú rozdiely v srdcovom tepe, tlaku, vylučovaní hormónov, trávení, nálade, kognitívnom výkone, pričom najočividnejším prejavom cirkadiálneho rytmus je spánok. Dôležitým zistením je, že modré svetlo najmä vo večerných hodinách negatívne ovplyvňuje dĺžku a kvalitu spánku. Tento negatívny vplyv je spôsobený najmä potlačením vylučovania hormónu melatonínu, ktorý je dôležitým hormónom vyplavovaným najmä v noci. Vďaka nemu v tele môžu prebiehať regeneračné a opravné procesy, ktoré majú v konečnom dôsledku priamy na kognitívny výkon a celkovú vitalitu človeka. Preto je dôležité modré svetlo blokovať najmä vo večerných hodinách približne 90 minút pred spánkom. Synchronizáciou cirkadiálneho rytmu s prirodzeným striedaním dňa a noci, môžeme dosiahnuť zvýšenú bdelosť, psychický aj fyzický výkon ale aj celkovú vitalitu človeka a zvýšenie kvality spánku. Naopak narušenie cirkadiálneho rytmu vedie k zdravotným

problémom od výkyvov energie počas dňa až po rakovinu. Dnes najbežnejšie a najviac ohrozenou skupinou ľudí sú pracovníci nočných zmien.

Vplyv svetla na cirkadiánnny rytmus, je oblasť ktorou sa začali okrem výskumníkov zaoberať aj výrobcovia osvetľovacích technológií. Fakt, že denné osvetlenie je pre človeka najprirodzenejšie sa odzrkadlil aj na svetelných zdrojoch, najmä v zmysle regulácie náhradnej teploty chromatickosti a intenzity osvetlenia v závislosti na čase. Aj to je jeden z dôvodov, prečo sú požiadavky na takéto zdroje, uvedené v tejto časti, vyvodené z charakteristík denného osvetlenia. Nové možnosti regulácie týchto parametrov u svetelných zdrojov, ktoré sú dnes bežne dostupné na trhu, odzrkadľujú vedomosti o cirkadiánnom rytme a ich snahu o implementáciu v každodennej svetelnej hygiene ľudí, či už na pracovisku alebo v domácnosti. Najtypickejším príkladom takéhoto produktu je rada LED zdrojov Philips Hue. Tieto svetelné zdroje ponúkajú možnosť regulácie teploty chromatickosti a intenzity v takom intervale, ktorý je schopný dostatočne imitovať túto zmenu prirodzene sa vyskytujúcu v dennom osvetlení. Na podobnom princípe fungujú aj produkty z rady Ikea Trådfri alebo LED zdroj Vitae Light. Pre osvetľovanie väčších priestorov ako sú školské zariadenia alebo kancelárske priestory existujú plnospektrálne LED zdroje od spoločnosti Spectrasol. U tohto zdroju spoločne s LED zdrojom TRI-I od Toshiby bola vyvinutá snaha o plnospektrálne zdroje, ktoré sa svojím svetelným spektrom čo najviac približujú spektru slnečného žiarenia vid'. obr. 22 a obr. 21.

V poslednej časti je prezentovaný návrh testovania osvetľovacej sústavy pre zlepšenie kognitívnych funkcií. Toto testovanie je rozdelené na 3 časti: požiadavky kladené na testovanie, analýza týchto požiadaviek a konkrétny návrh testovania. Testovanie je inšpirované výskumom, ktorý sa venoval skúmaniu vplyvu pro-kognitívneho osvetlenia na pražskom Gymnáziu Na Pražačke. Testovanie si kladie za úlohu preukázať pozitívny vplyv na kognitívny výkon účastníkov testovania, čomu boli aj prispôsobené kognitívne testy. Prvým testom je test pozornosti d2, ktorý je všeobecne uznávaným a prepracovaným testom. Druhým testom je test krátkodobej pamäte, kedy sú účastníci vyzvaní k zapamätaniu si série náhodne vybraných 10 francúzskych hracích kariet a následne je od nich žiadané, aby zoskupili tieto nimi zapamätané čísla podľa daných kritérií. Problémom pri realizácii testovania sa stala pandémia koronavírusu, ktorá znemožnila prítomnosť autora alebo účastníkov testovania

v priestoroch školy. Z toho dôvodu nie je v tejto práci zahrnutá realizácia tohto testovania. Toto obmedzenie spätne zasiahlo aj do zadania tejto diplomovej práce, kedy bola vykonaná zmena zadania, v zmysle upustenia od tohto testovania. Zároveň to predstavovalo problém pri návrhu testovania, kedy nebolo možné do návrhu implementovať obmedzenia a odporúčania, teoreticky získané počas konania testov, či už zo strany autora alebo odborných pracovníkov laboratória svetelnej techniky.

Problematika cirkadiálneho a pro-kognitívneho osvetľovania je pomerne nová, čo jej však neuberá na dôležitosti a je v dnešnej dobe čoraz viac a hlbšie skúmaná a diskutovaná. Pri dostatočnej pozornosti venovanej tejto problematike je možné vytvoriť lepšie a kvalitnejšie životné prostredie, ktoré bude viesť k vyššej produktivite, kvalitnejšiemu životu a k celkovej spokojnosti človeka.

Zdroje

- [1] WURTMAN, Richard J. *The Effects of Light on the Human Body* [online]. s. 69-77 [cit. 2020-01-20]. Dostupné z: <http://wurtmanlab.mit.edu/static/pdf/286.pdf>
- [2] ŠTĚPÁNEK, Jaroslav. *Fotobiologická bezpečnost světelných zdrojů a osvětlovacích soustav* [online]. Brno, 2014 [cit. 2020-01-20]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/31744>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav elektroenergetiky. Vedoucí práce Jan Škoda.
- [3] DVOŘÁK, Petr. *Vliv modrého světla na lidský organismus*. Technická 12, Brno, 2016. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.
- [4] MÜNICH, Mirjam, Adam E. BRONDSTED, Steven A. BROWN, et al. *The Effect of Light on Humans* [online]. In: . 2017 [cit. 2020-01-20].
- [5] Lidské oko. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2019 [cit. 2020-01-20]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Lidsk%C3%A9_oko
- [6] KOLÁŘ, J. *Biologické rytmy a fotoperiodizmus rostlin* [online]. In: . s. 9 [cit. 2020-01-20]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/2290522/>
- [7] Light therapy. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2020 [cit. 2020-01-20]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Light_therapy
- [8] Dawn simulation. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2019 [cit. 2020-01-20]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Dawn_simulation
- [9] Daylighting. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2020 [cit. 2020-01-20]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Daylighting>
- [10] Phase response curve. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2019 [cit. 2020-01-20]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Phase_response_curve
- [11] Light effects on circadian rhythm. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2019 [cit. 2020-01-20]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Light_effects_on_circadian_rhythm
- [12] *Ionizující a neionizující záření ze zdravotního hlediska* [online]. Technická 12, Brno, 2011 [cit. 2020-01-20]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace?zp_id=35483. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [13] JANDA, Martin. JAK PRACUJE: Lidské oko. *21stoleti.cz* [online]. 2006 [cit. 2020-01-20]. Dostupné z: <https://21stoleti.cz/2006/02/17/jak-pracuje-lidske-oko/>
- [14] HOLZMAN, David C. *What in a Color? The Unique Human Health Effects of Blue Light* [online]. 2010, , 23-27 [cit. 2020-01-20]. Dostupné z: https://www.jstor.org/stable/30249892?seq=6#page_scan_tab_contents

- [15] ŠPÉROVÁ, Lenka. *Cirkadiánní rytmy u člověka* [online]. Kotlářská 2, Brno, 2008 [cit. 2020-01-20]. Dostupné z: <https://theses.cz/id/ff1gz6/?lang=sk>. Bakalářská práce. Masarykova univerzita, Přírodovědecká fakulta.
- [16] OTT, John N. *Health and Light* [online]. 2. vyd. New York: Pocket Books, 2000 [cit. 2020-01-20]. ISBN 0-898-04098-1. Dostupné z: <https://www.ratical.org/ratville/AoS/HealthAndLight.pdf>
- [17] Elektromagnetické spektrum. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2019 [cit. 2020-01-20]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Elektromagnetick%C3%A9_spektrum
- [18] Jak pracuje lidské oko. *Videní.cz* [online]. 2014 [cit. 2020-01-20]. Dostupné z: <http://www.videni.cz/oko/36-jak-pracuje-lidske-oko>
- [19] *Lidské oko* [online]. 2008 [cit. 2020-01-20]. Dostupné z: <https://sites.google.com/site/hvezdarnacz/lidske-oko>
- [20] In: *Laboratorní průvodce* [online]. [cit. 2020-01-20]. Dostupné z: https://www.labo.cz/mft/rad_pasma.htm
- [21] FUKSA, Antonín. Světlo. *Světlo* [online]. 2010, (6) [cit. 2020-01-20]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/svetlo/casopis/tema/svetlo-a-biologicke-hodiny--15461>
- [22] *Cirkadiánní rytmus* [online]. 2013 [cit. 2020-01-20]. ISSN 2336-5897. Dostupné z: https://wikisofia.cz/wiki/Cirkadi%C3%A1nn%C3%AD_rytmus
- [23] *Wake-Up Light Alarm Clock with Colored Sunrise Simulation* [online]. In: . [cit. 2020-01-20]. Dostupné z: <https://usefultoolstore.com/wake-up-light-alarm-clock-with-colored-sunrise-simulation/>
- [24] *Brýle blokující 80% modrého světla* [online]. In: . [cit. 2020-01-20]. Dostupné z: <https://www.brainmarket.cz/bryle-blokujici-modre-svetlo/bryle-blokujici-80--modreho-svetla/>
- [25] *This Light-Emitting Wearable Can Boost Your Winter Productivity* [online]. In: . [cit. 2020-01-20]. Dostupné z: <https://www.inc.com/kate-l-harrison/this-light-emitting-wearable-can-boost-your-winter-productivity.html>
- [26] *Ušetrite peniaze so svetlovodom aj Vy!* [online]. In: . [cit. 2020-01-20]. Dostupné z: <http://www.modularnedomy.sk/usetrite-peniaze-so-svetlovodom-aj-vy/>
- [27] CHABOROVÁ, Iva. *Teplota chromatickosti (farebná teplota svetla)* [online]. In: . [cit. 2020-05-25]. Dostupné z: <https://blog.exkalibr.sk/index.php/2019/01/17/teplota-chromatickosti-farebna-teplota-svetla/>
- [28] Wavelength of Visible Light Spectrum. In: *ScienceStruck* [online]. [cit. 2020-05-25]. Dostupné z: <https://sciencestruck.com/wavelength-of-visible-light-spectrum>
- [29] WETHER, Tim. *Emitted light spectrum* [online]. In: . [cit. 2020-05-25]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Color_rendering_index#/media/File:Simple_spectrum_scope.jpg
- [30] ROSSI, Maurizio. *Circadian Lighting Design in the LED Era* [online]. Cham: Springer, 2019 [cit. 2020-05-21]. ISBN 978-3-030-11086-4. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-11087-1>

- [31] FOSTER, Russell G. a Leon KREITZMAN. *Circadian Rhythms: A Very Short Introduction* [online]. Oxford: Oxford University Press, 2017 [cit. 2020-05-21]. ISBN 978-0-19-102747-5.
- [32] Smart glass. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2020 [cit. 2020-05-24]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Smart_glass
- [33] MAIEROVÁ, Lenka a Igor KYTKA. *Vyhodnocení vlivu pro-kognitivního osvětlení v budově Gymnázia Na Pražačce: Závěrečná výzkumná zpráva*. Praha, 2020.
- [34] TRI-R Technology. *Toshiba Materials Co., Ltd* [online]. [cit. 2020-05-25]. Dostupné z: <https://www.toshiba-tmat.co.jp/en/tri-r/technology/>
- [35] *Spectrasol: Biodynamic Human Solutions* [online]. [cit. 2020-05-21]. Dostupné z: <https://www.spectrasol.cz/>
- [36] BRICKENKAMP, Rolf a Eric ZILLMER. *Test pozornosti d2*. Praha: Testcentrum, 2000. ISBN 80-86471-00-4.
- [37] BÍLEK, Petr. *Automatické vyhodnocení d2 testu pomocí metod počítačového vidění*. Praha, 2017. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, Katedra počítačové grafiky a interakce. Vedoucí práce Ing. David Sedláček, Ph.D.